

Chapitre 1 : Introduction

Chapitre 2: La Terre Habitable

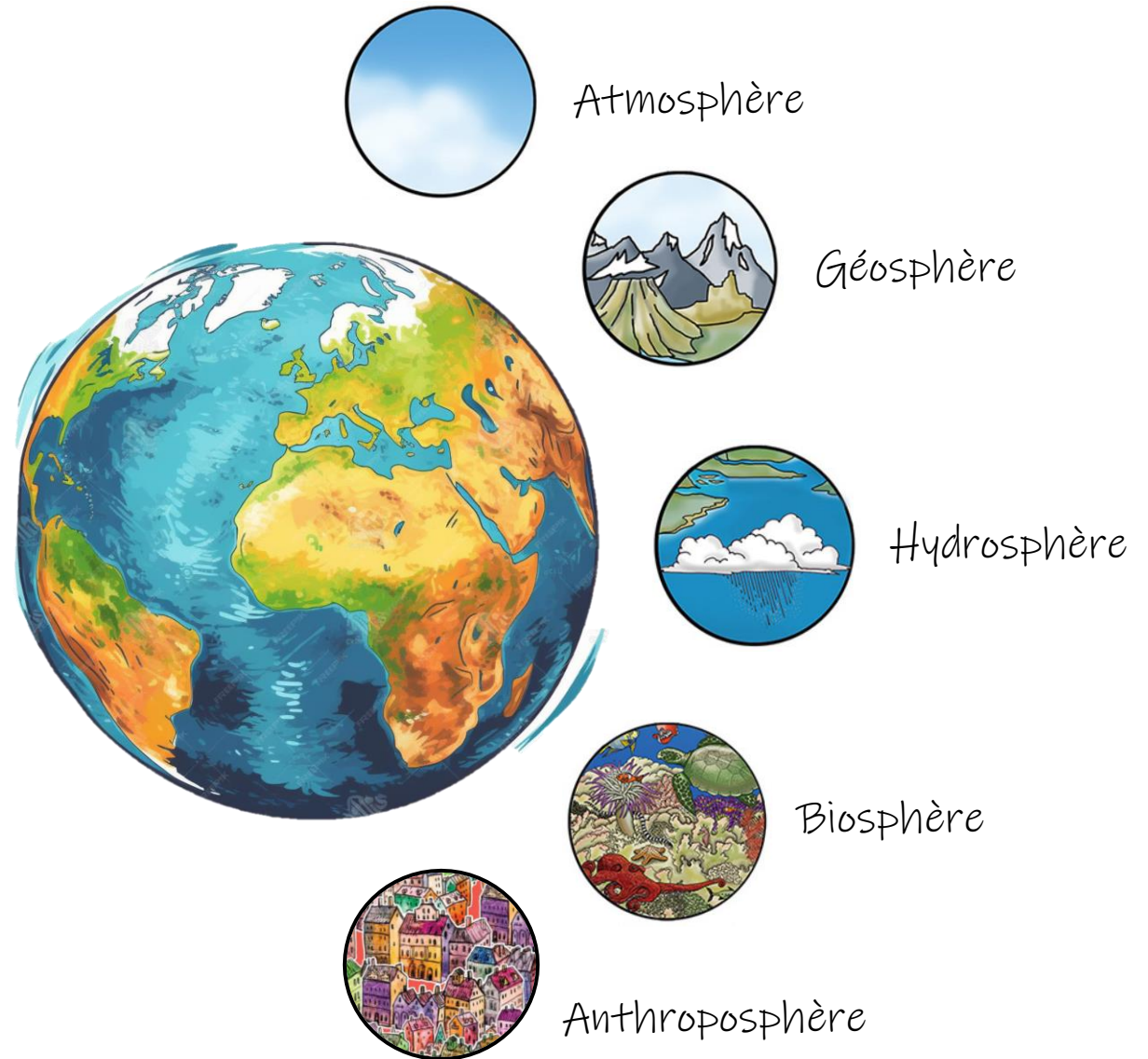
Chapitre 3 : La Géosphère

Chapitre 4 : L'Hydrosphère

Chapitre 5: L'Atmosphère

Chapitre 6 : La Biosphère

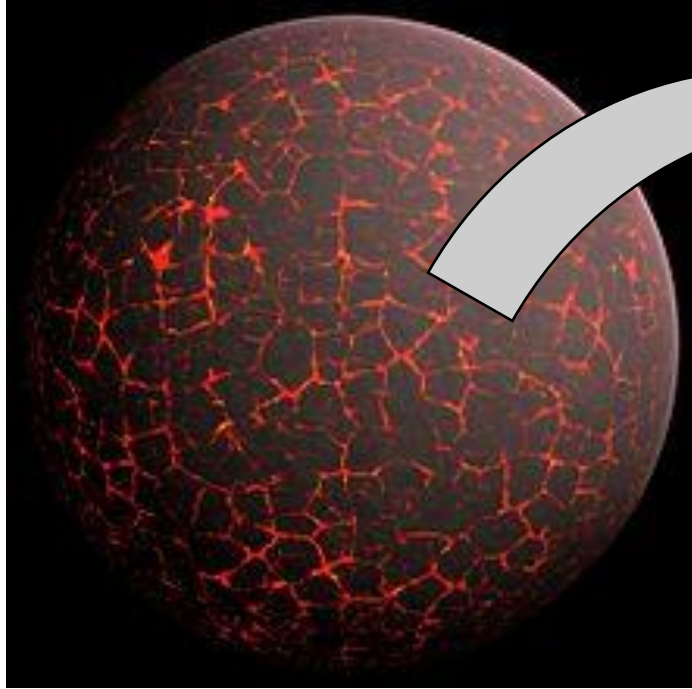
Chapitre 7 : L'Anthroposphère



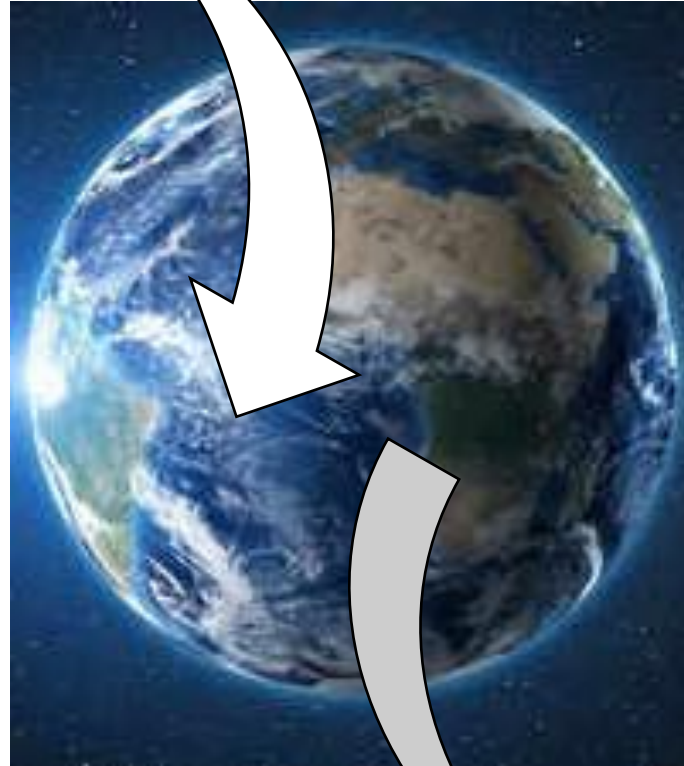
Chapitre 2: La terre habitable

Ce cours vous aidera à comprendre:

- Paramètres astronomiques et géologiques de l'habitabilité
- Paramètres géologiques de l'habitabilité
- L'évolution de l'hydrosphère et atmosphère vers l'habitabilité
- L'évolution du climat

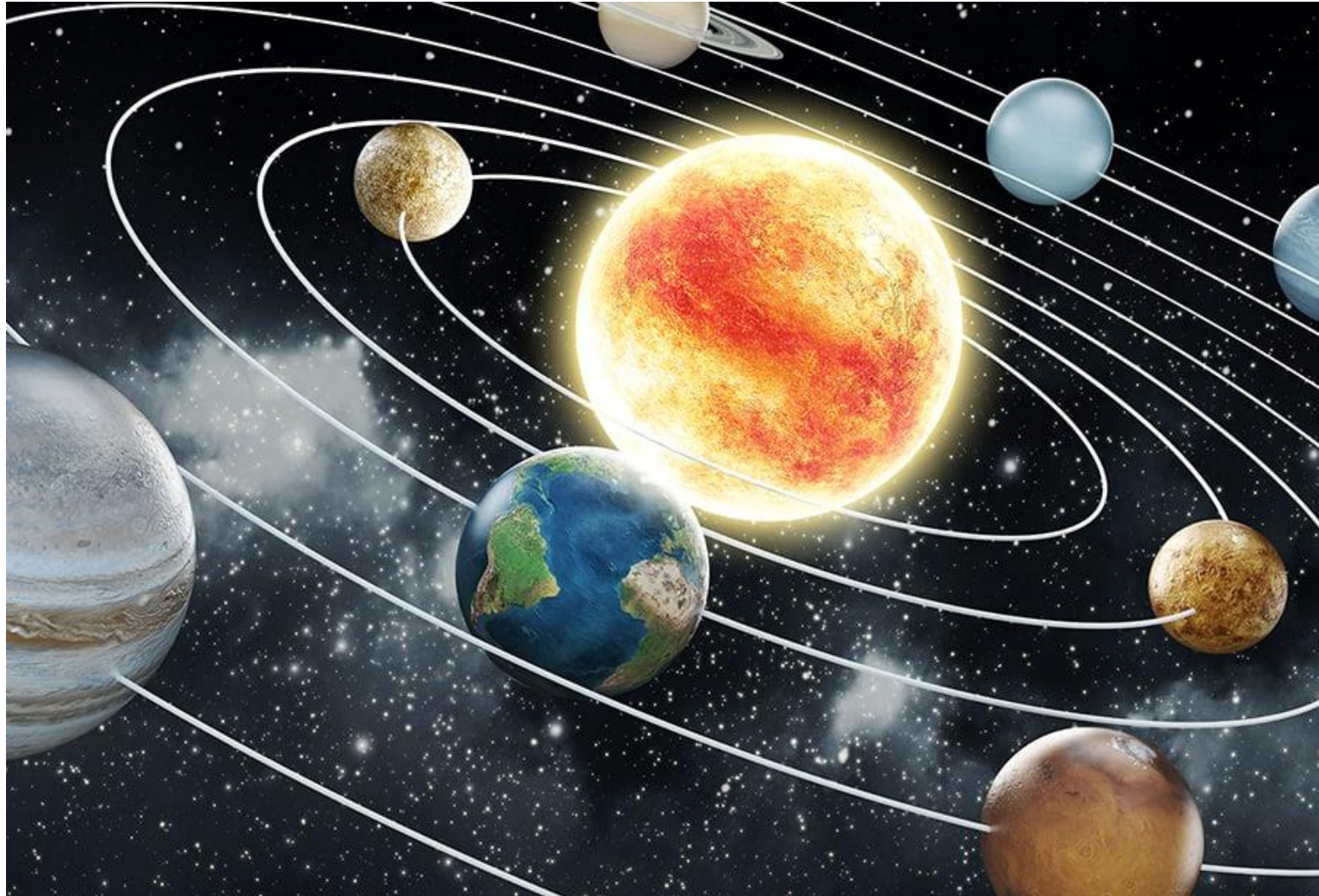


- Nous sommes passés de cette Terre à cette Terre en 4.5 milliards d'années



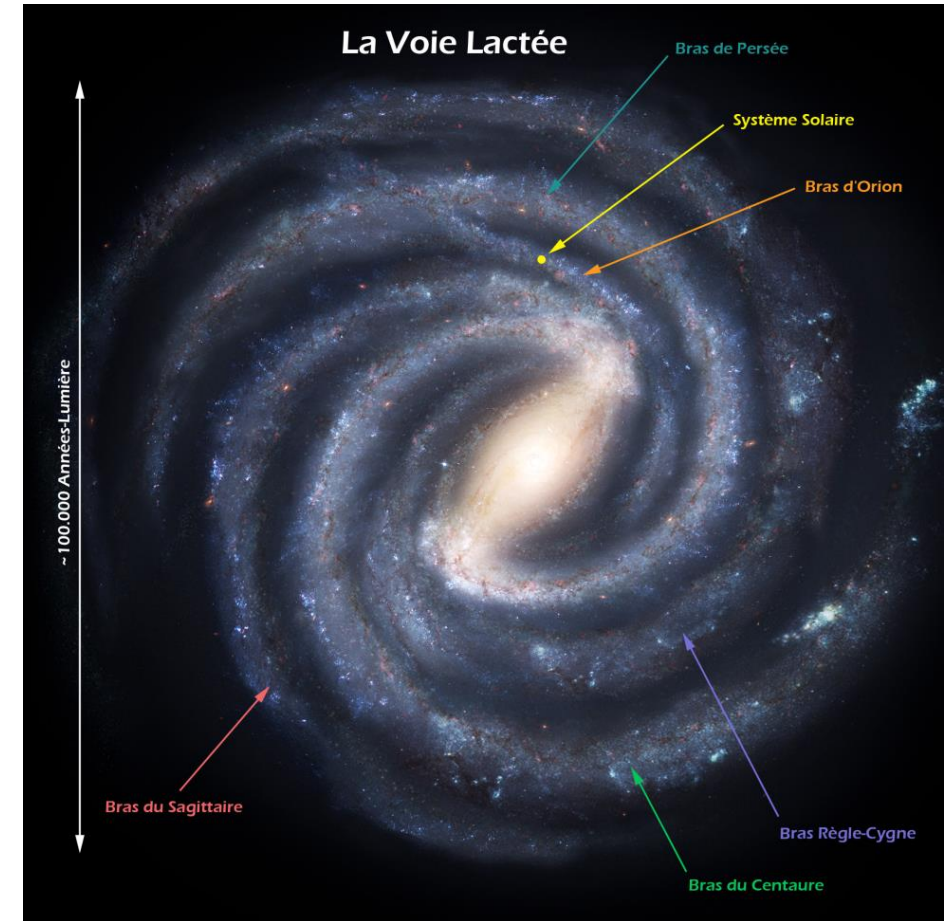
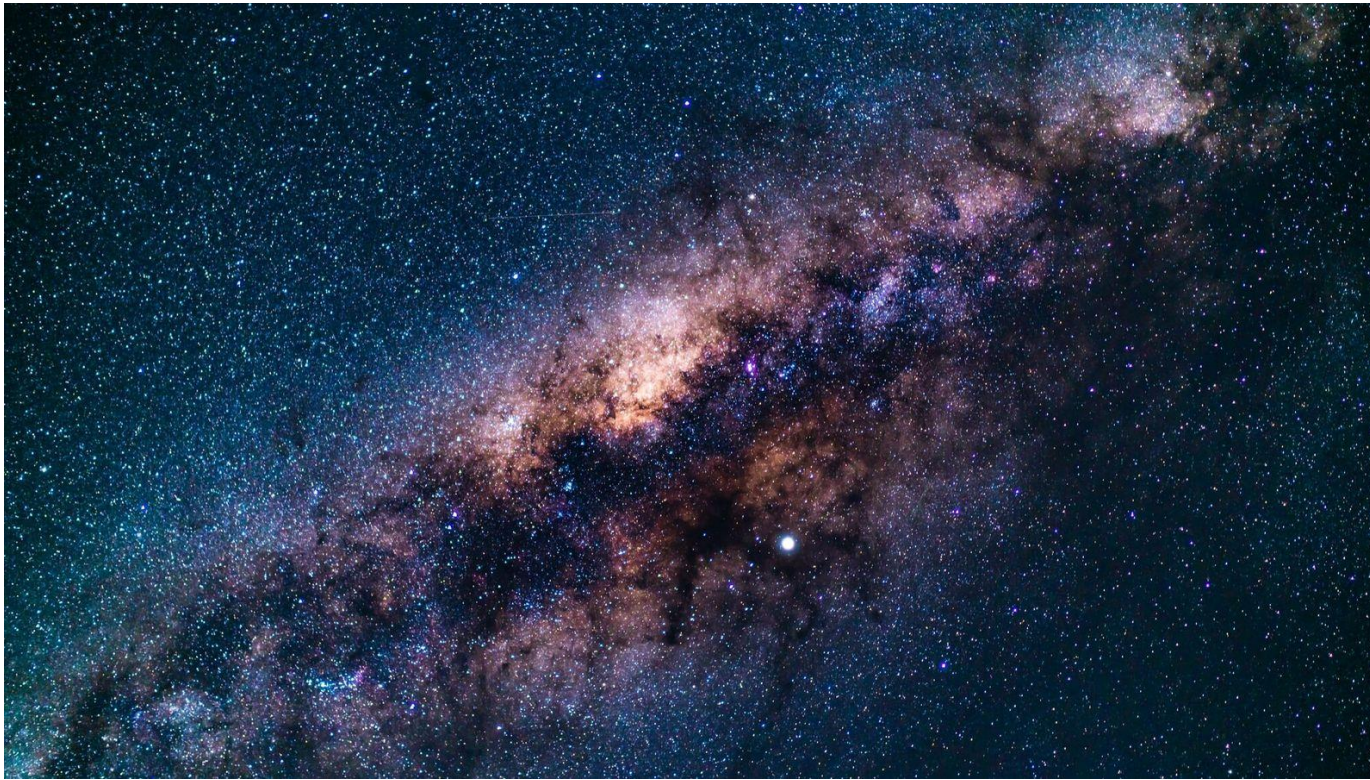
- Veux t'on passer à cette Terre en quelques centaines d'années?

1. Paramètres astronomique de l'habitabilité



-13,6 milliards d'années.

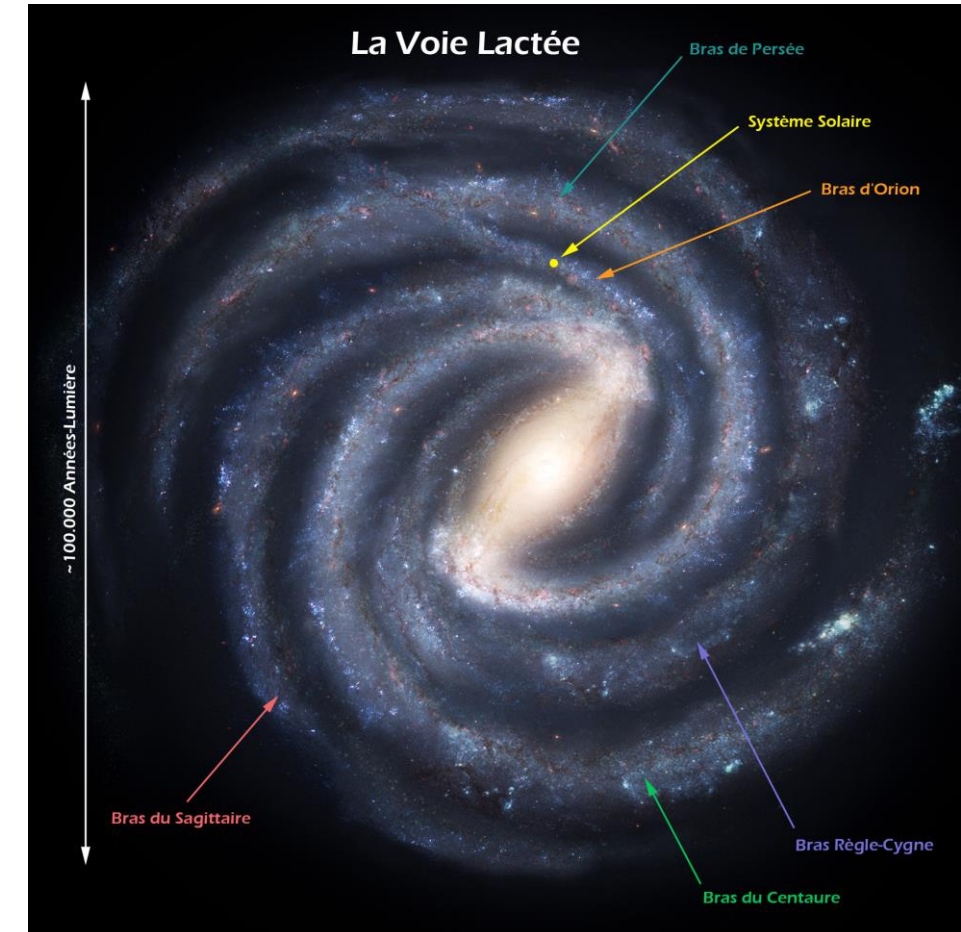
La Voie lactée: entre 200 et 400 milliards d'étoiles!



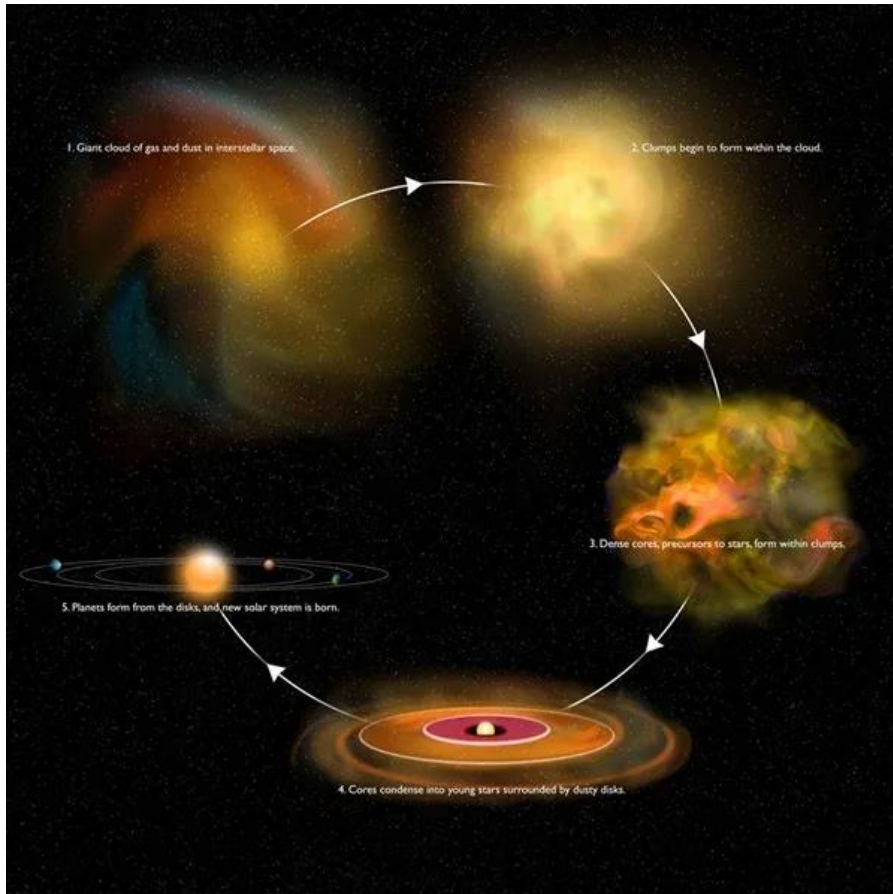
Zone habitable galactique: Pour que la vie puisse apparaître sur une planète, il ne suffit pas qu'elle soit dans l'écosphère de son étoile ; son système planétaire doit se situer assez près du centre de la galaxie pour avoir suffisamment d'éléments lourds qui favorisent la formation de planètes telluriques

La position du système solaire est idéal dans la galaxie de la Voie lactée est un endroit favorable à la vie car il est suffisant proche du centre pour avoir suffisamment d'éléments lourds qui favorisent la formation de planètes telluriques mais suffisamment loin du centre pour éviter:

- des frôlements d'étoiles provoquant des instabilités orbitales ou des pluies de comètes et astéroïdes
- les radiations de supernovas
- le ou les grands trous noirs du centre galactique.



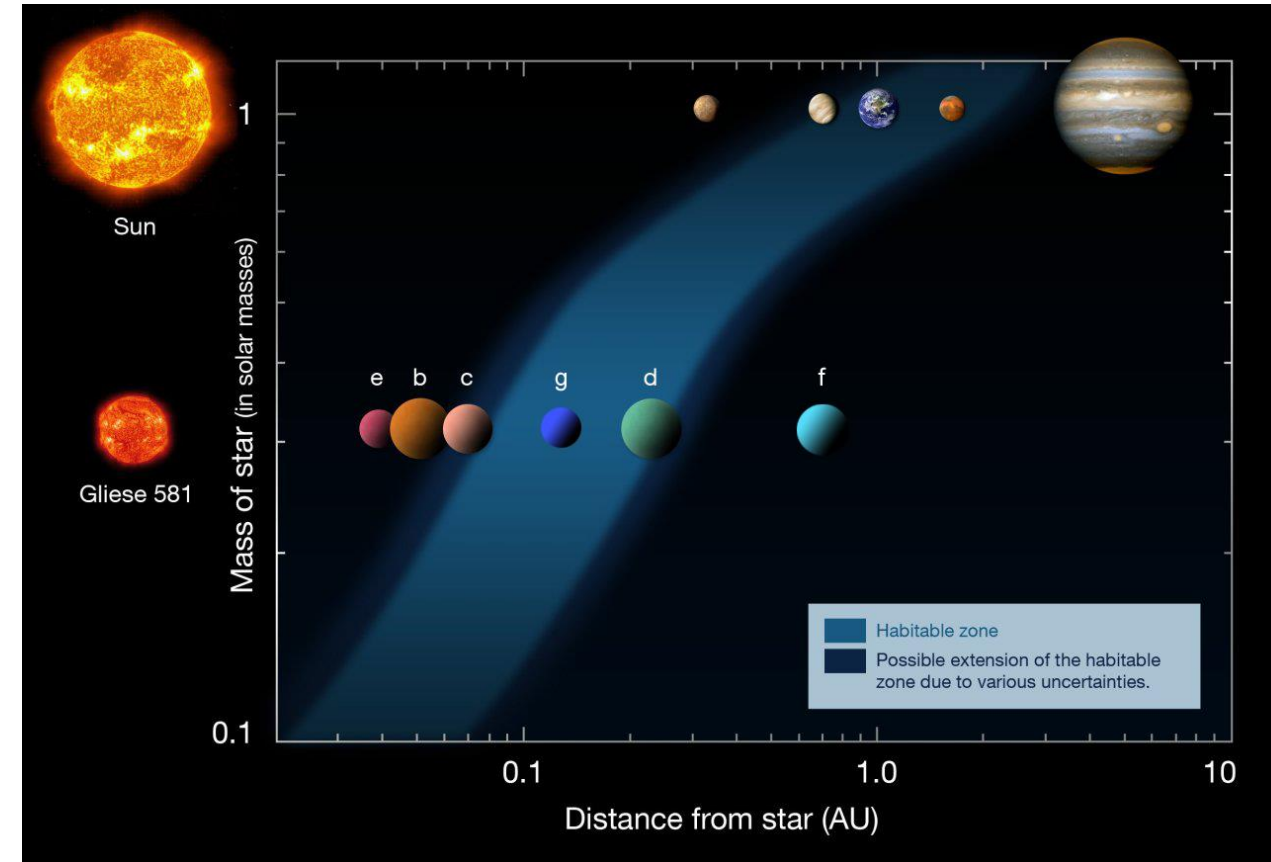
- -4,6 milliards d'années: effondrement d'un gigantesque nuage de gaz et de poussières recouvertes de glace sous l'effet de sa propre gravité → formation d'une protoétoile et d'un disque protoplanétaire (avec protoplanètes)
- Formation du Soleil au centre par fusion nucléaire
- Agglomération progressive des poussières du disque = accrétion → formation des 8 planètes + satellites



Zone habitable circumstellaire: zone définie autour d'une étoile, où les conditions de température permettent à l'eau liquide d'exister à la surface de la planète

La zone habitable circumstellaire dépend:

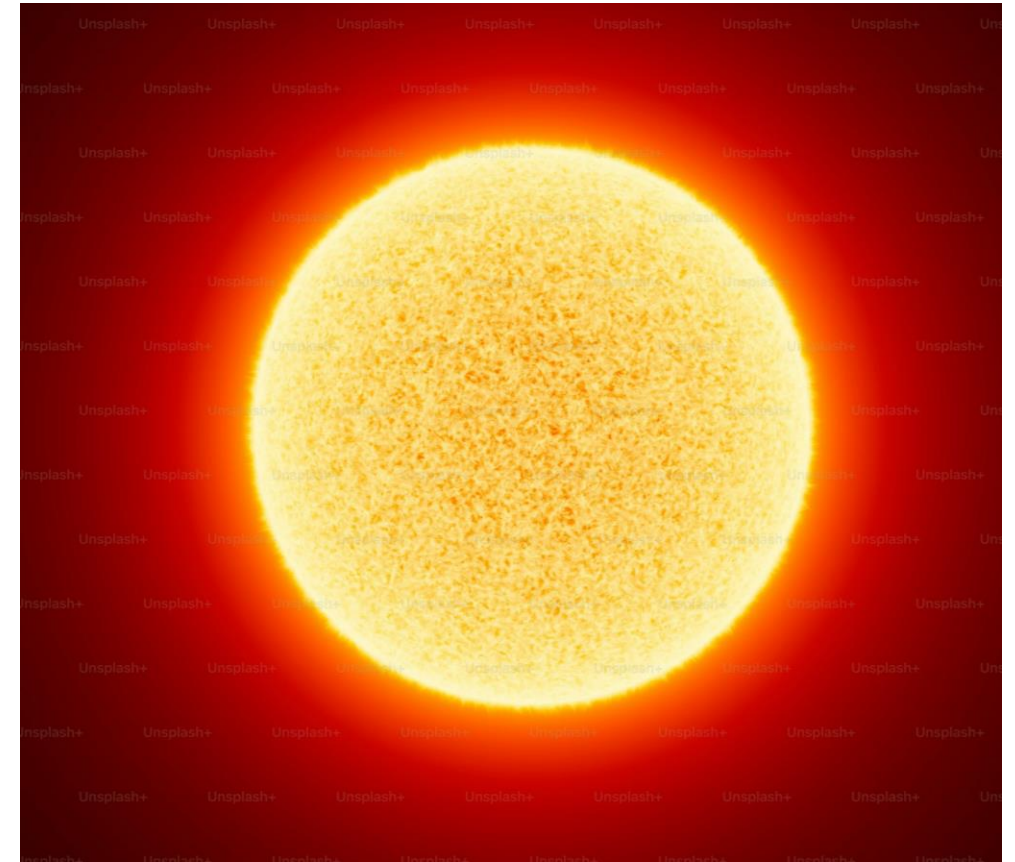
- du flux radiatif de l'étoile hôte
- du rayon de l'orbite de la planète
- de la masse de la planète



Zone habitable circumstellaire: zone définie autour d'une étoile, où les conditions de température permettent à l'eau liquide d'exister à la surface de la planète

Le soleil est une étoile idéale pour la vie

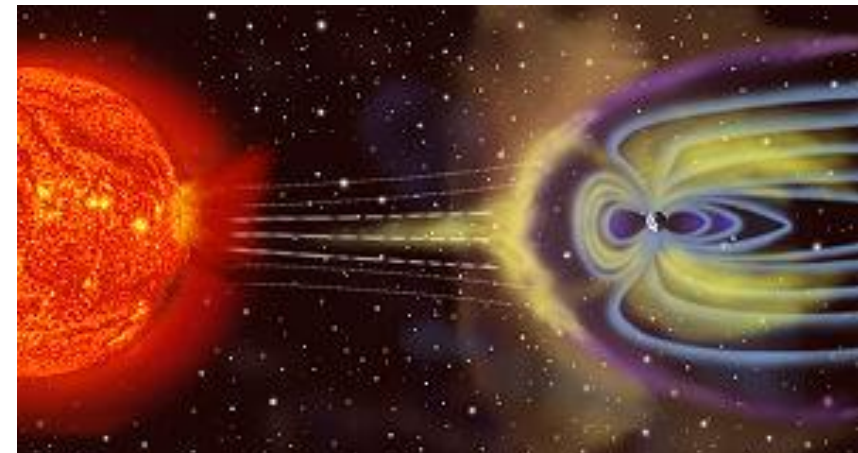
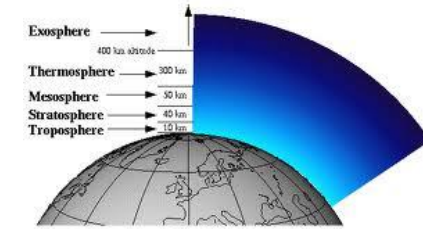
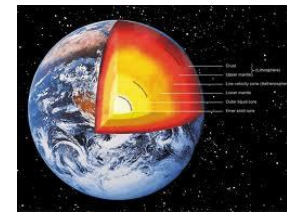
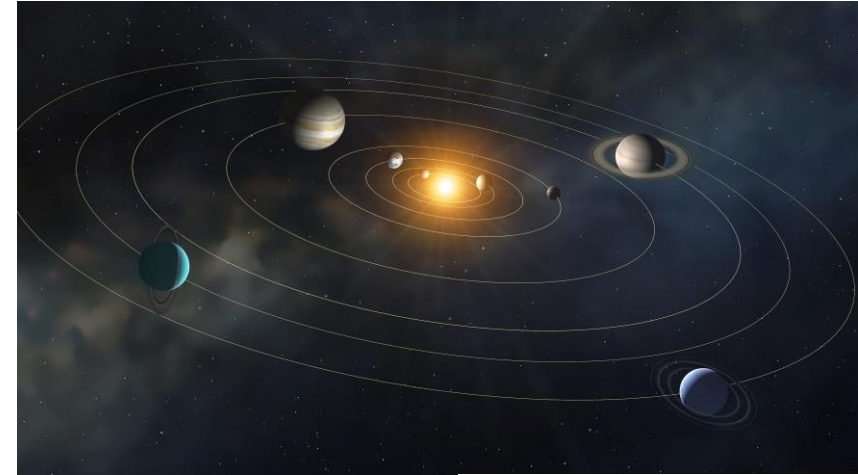
- Il n'est pas trop gros et a une vie de plusieurs milliards d'années permettant l'évolution de la vie.
- Il émet suffisamment d'UV haute fréquence pour former de l'ozone mais éviter l'ionisation de la vie.
- L'eau liquide peut exister à la surface de planètes en orbite à une distance qui n'induit pas de verrouillage gravitationnel.
- Il émet de manière très stable variant de $<0.1\%$



Zone habitable circumstellaire: zone définie autour d'une étoile, où les conditions de température permettent à l'eau liquide d'exister à la surface de la planète

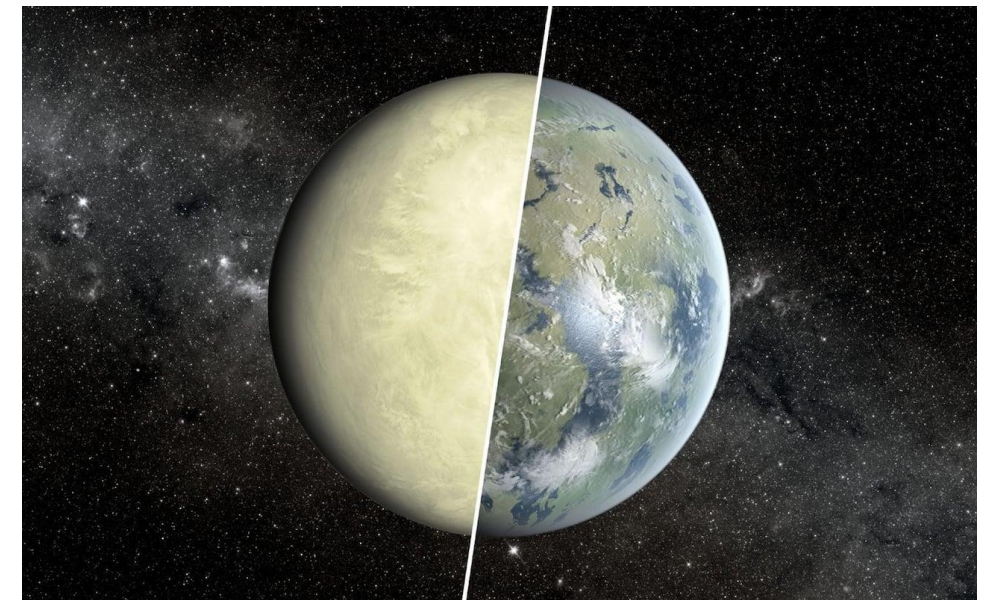
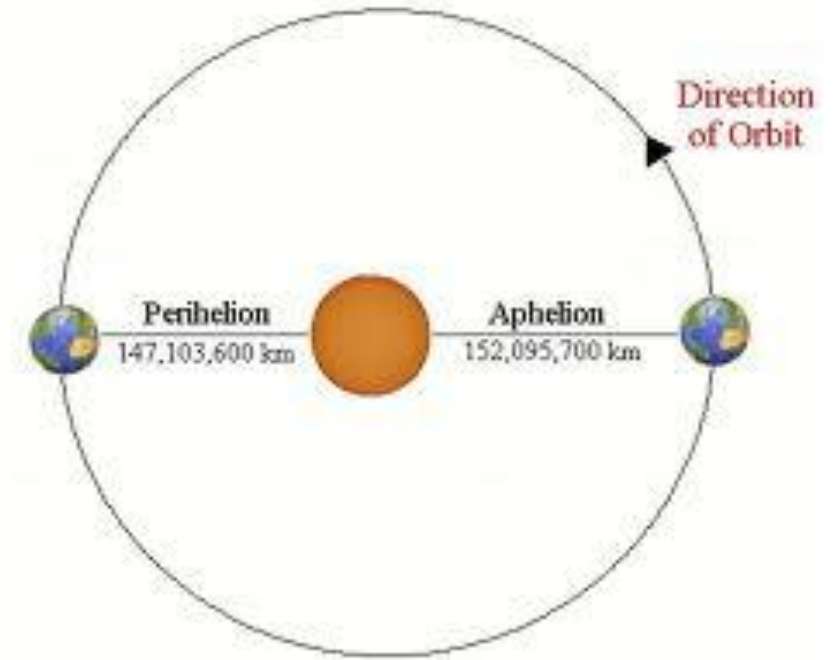
La Terre est une planète idéale pour la vie.

- Elle est suffisamment proche de son étoile pour avoir accumulé des éléments lourds et formé une planète avec une surface solide : c'est une planète tellurique et non un géant gazeux.
- Elle possède une masse suffisante pour maintenir une atmosphère grâce à la gravité, rester géologiquement active pendant des milliards d'années, et permettre ainsi l'apparition et le maintien de la vie.
- Sa masse permet également d'avoir un noyau liquide, indispensable à la génération d'un champ magnétique qui protège la surface de la planète des rayonnements cosmiques et des particules solaires.

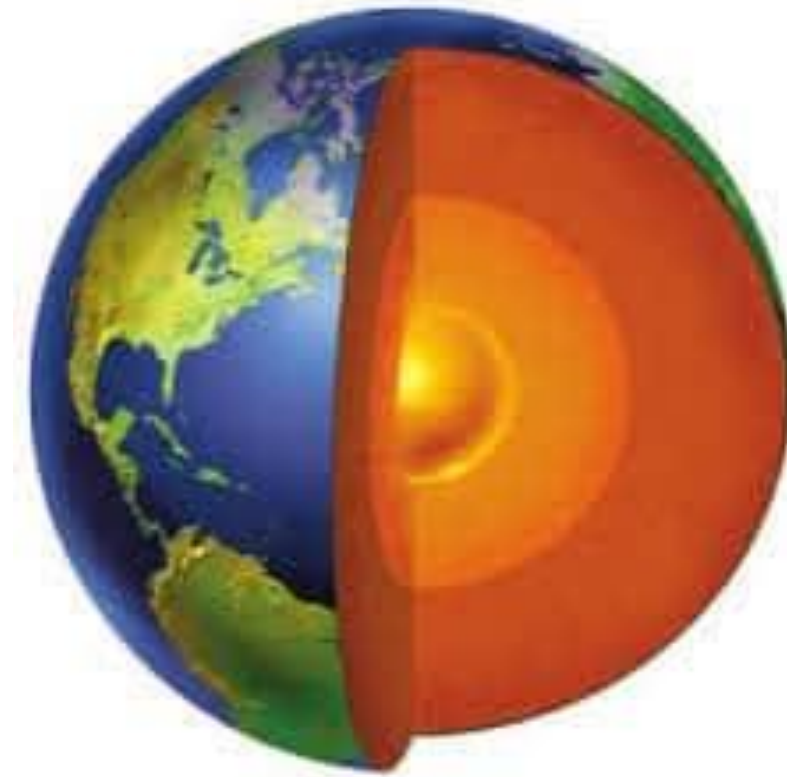


La terre a des paramètres orbitaux parfait pour la vie

- Rotation très stable et presque circulaire donc peu de changement de climat
- Taux de rotation permettant la vie (non verrouillé par les marées avec une face faisant face en permanence à son étoile) et suffisamment rapide pour éviter trop de contraste de température entre différente face
- Inclinaison axiale modérée donnant des saisons et permettant la transmission de la chaleur
- Grande lune qui stabilise rotation et favorise les marées et le mélange de l'atmosphère et le mélange de l'océan



2. Paramètres géologiques de l'habitabilité



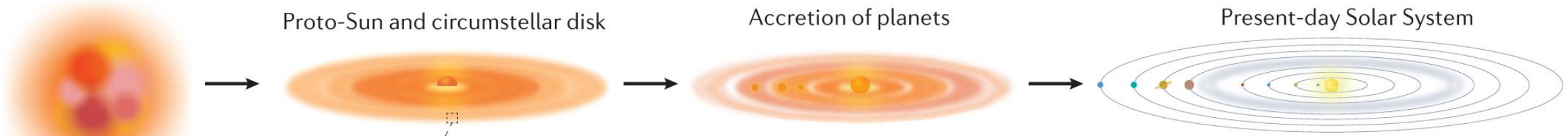
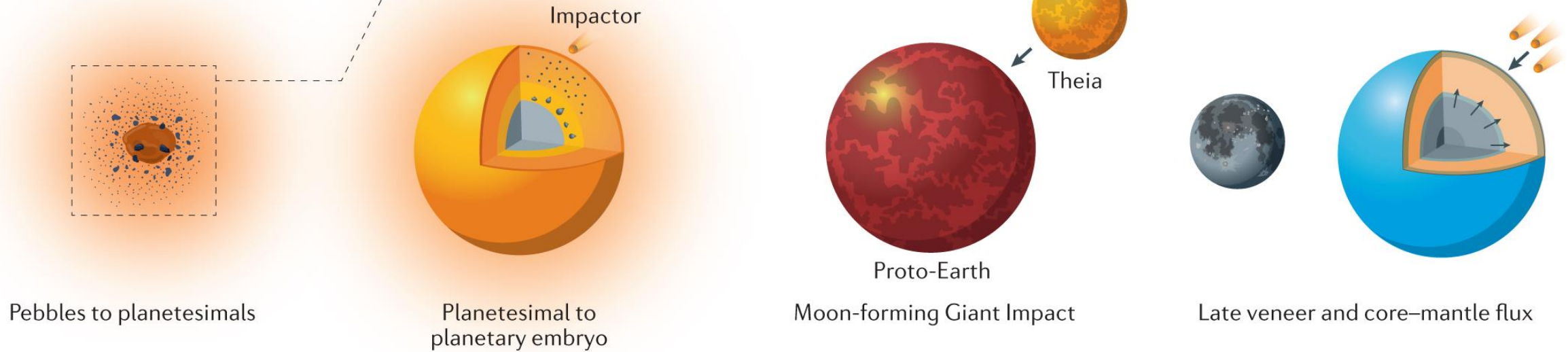
HISTORY OF OUR PLANET

IF



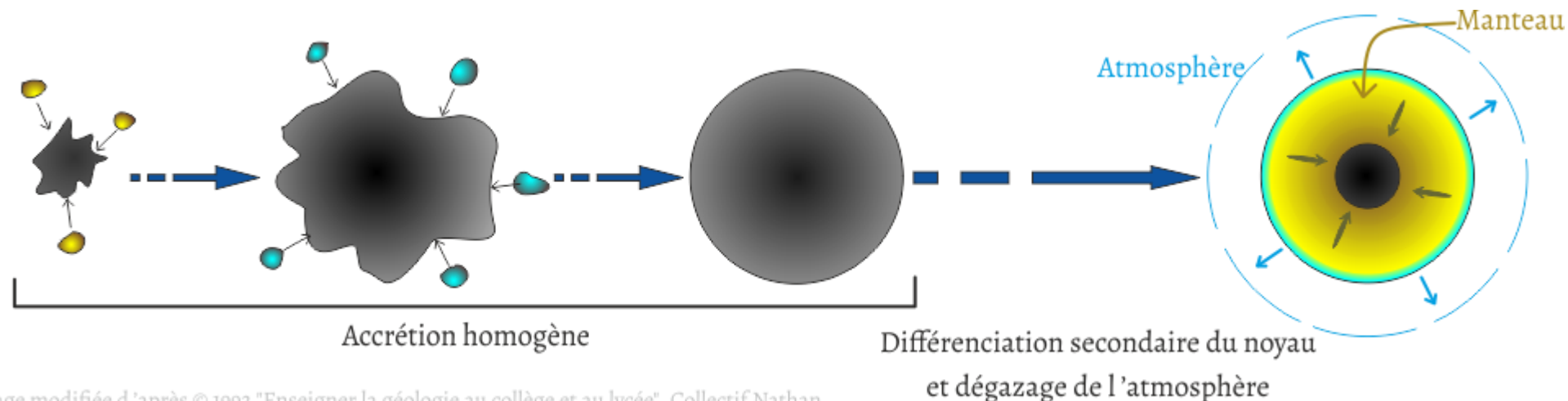
a Formation of the Solar System

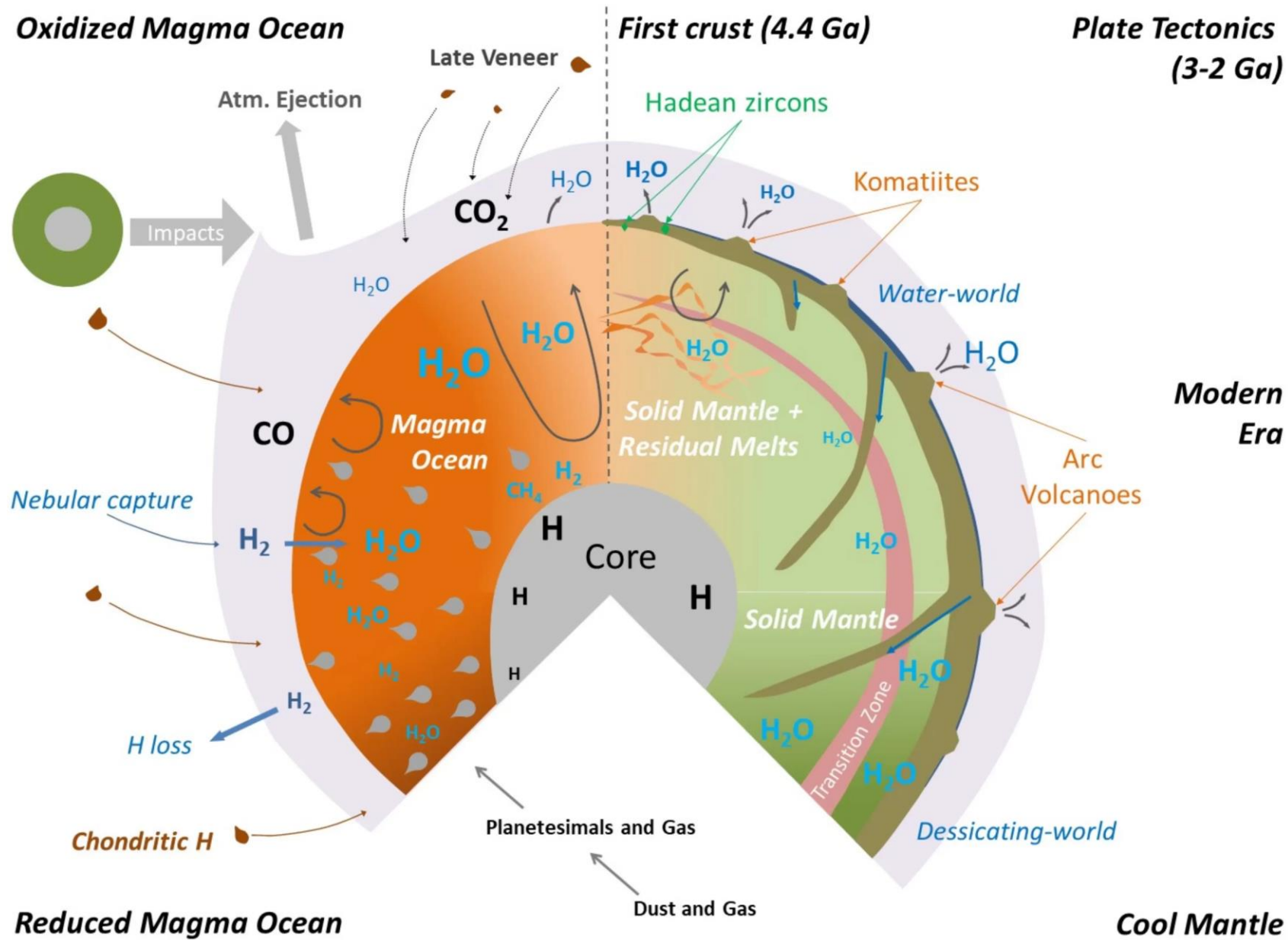
Core collapse in
a molecular cloud

**b Formation of the Earth and the Moon**

La Terre possède une géosphère active avec des plaques tectoniques, ce qui permet :

- **La différenciation chimique de la planète** : Tout au long de son histoire, la Terre a subi une différenciation chimique qui a permis la formation des croûtes continentale et océanique. Cette diversité géologique crée des environnements variés qui favorisent la biodiversité.
- **Le dégazage constant** : Grâce à l'activité géologique, la Terre continue de libérer des gaz via le dégazage volcanique, ce qui contribue à la formation et au maintien de l'atmosphère et de l'hydrosphère, éléments essentiels pour la vie.
- **Le recyclage des nutriments** : La tectonique des plaques assure le recyclage des éléments chimiques nécessaires aux cycles biogéochimiques et à la vie, tels que le cycle du carbone et du phosphore. Cela permet de réguler la composition de l'atmosphère et de l'hydrosphère, et de maintenir un climat stable favorable à la vie.





La différenciation géologique: Processus par lequel la Terre, en fusion dans sa jeunesse, s'est séparée en couches distinctes en fonction de la densité des matériaux.

Étapes principales :

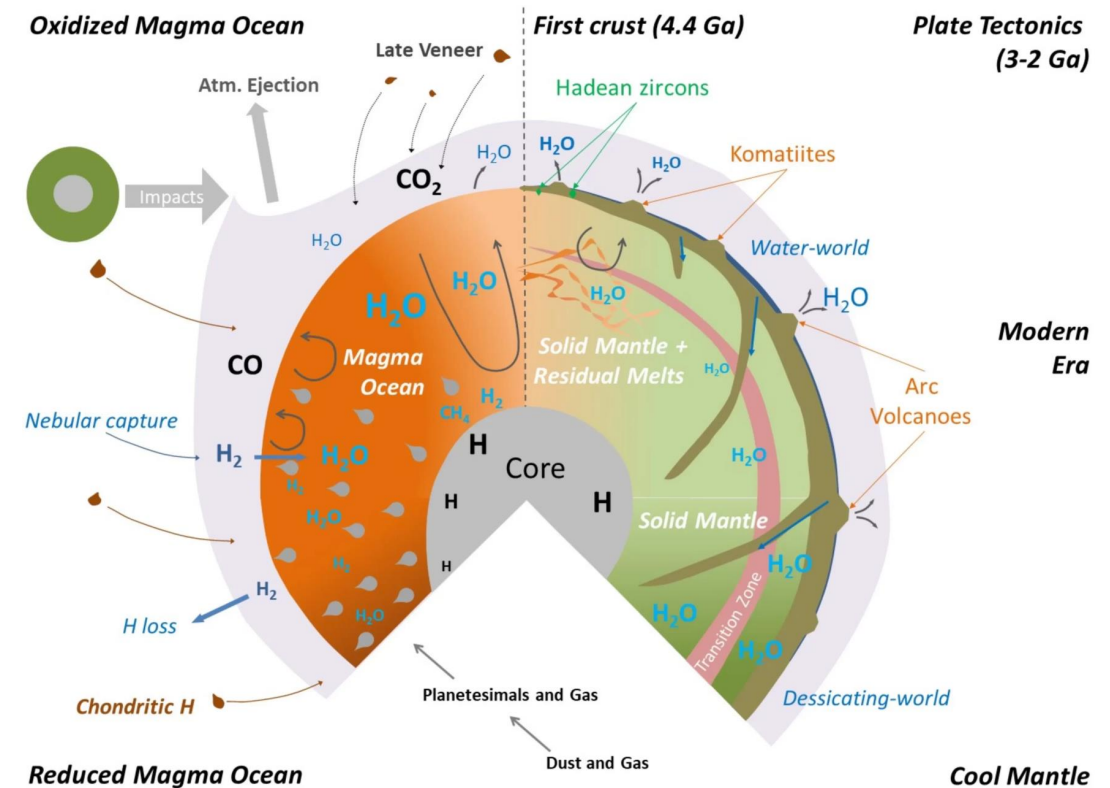
- Fusion partielle de la Terre primitive : La chaleur intense causée par les impacts, la radioactivité et la pression interne a provoqué la fusion des matériaux.
- Séparation par densité : Les éléments lourds comme le fer et le nickel ont migré vers le centre, formant le noyau. Les éléments plus légers, comme le silicium et l'oxygène, sont montés pour former le manteau et la croûte.
- Formation de couches géologiques : Ce processus a créé des couches distinctes : noyau interne et externe, manteau, et croûte terrestre.



La composition de la Terre est un facteur clé de son habitabilité et de la présence de la vie.

La formation du noyau:

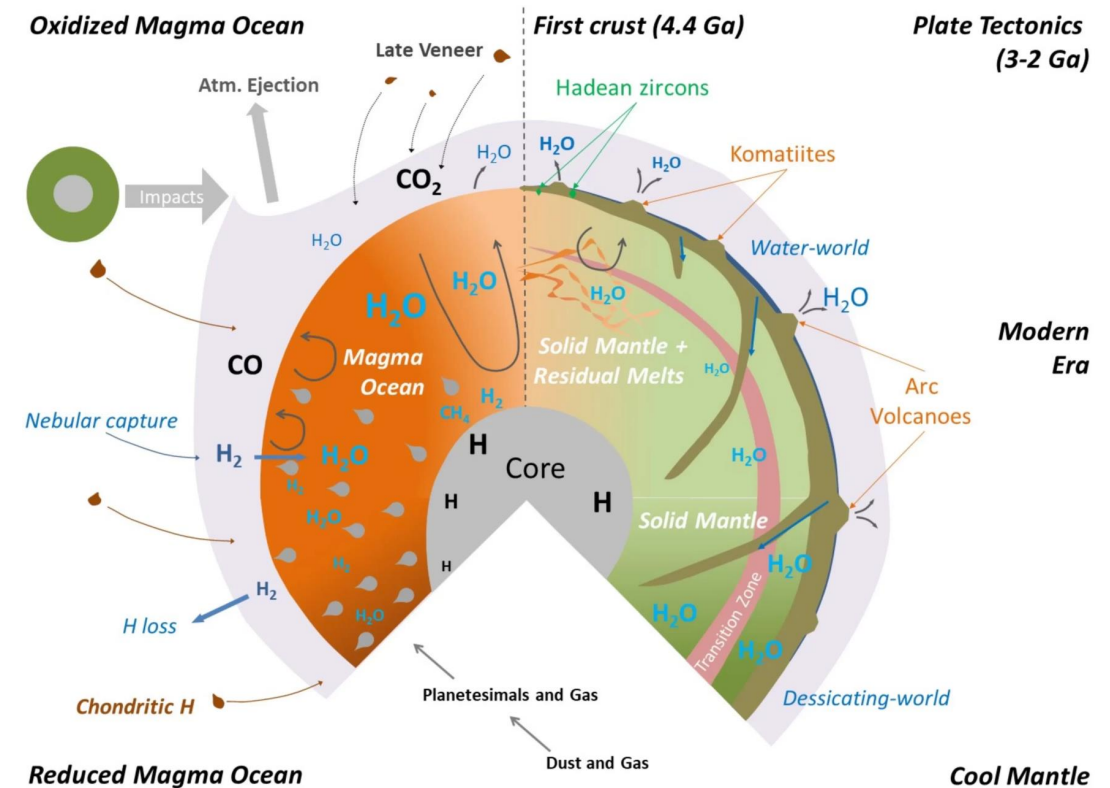
- **Métaux et éléments radioactifs** : La Terre contient des éléments métalliques (comme le fer, le nickel) et des éléments radioactifs (comme l'uranium) dans son noyau qui produisent de la chaleur par désintégration, ce qui alimente l'activité géologique et tectonique.
- **Formation du noyau et création du champ magnétique**: Le noyau externe, constitué de fer liquide, crée une géodynamo qui génère un champ magnétique. Le champ magnétique protège la Terre des vents solaires et des radiations cosmiques, contribuant à la préservation de l'atmosphère.



La composition de la Terre est un facteur clé de son habitabilité et de la présence de la vie.

La formation de la croûte terrestre et des éléments essentiels

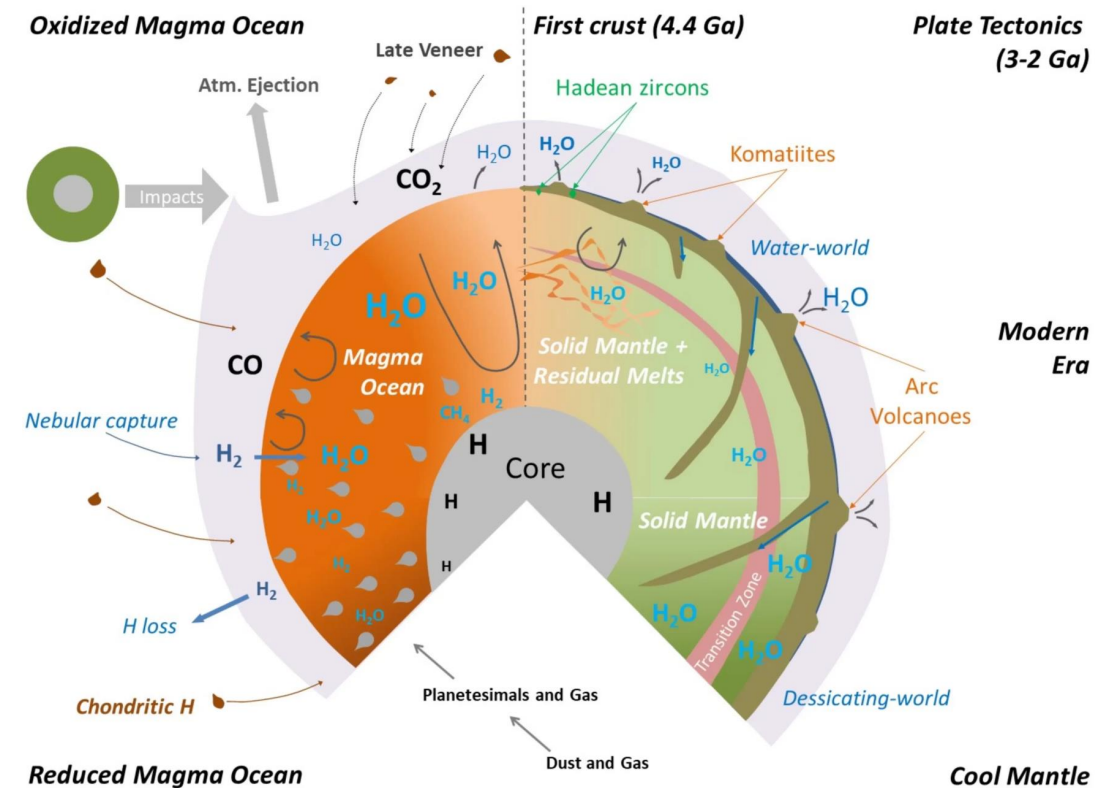
- **Disponibilité des éléments nutritifs** : La croûte, issue de la différenciation, contient des éléments légers comme le silicium, l'oxygène, le carbone, et des métaux comme le fer, le calcium et le potassium. Ces éléments sont cruciaux pour la chimie de la vie, rendant possible la formation des premières molécules organiques et la diversité biologique.



La composition de la Terre est un facteur clé de son habitabilité et de la présence de la vie.

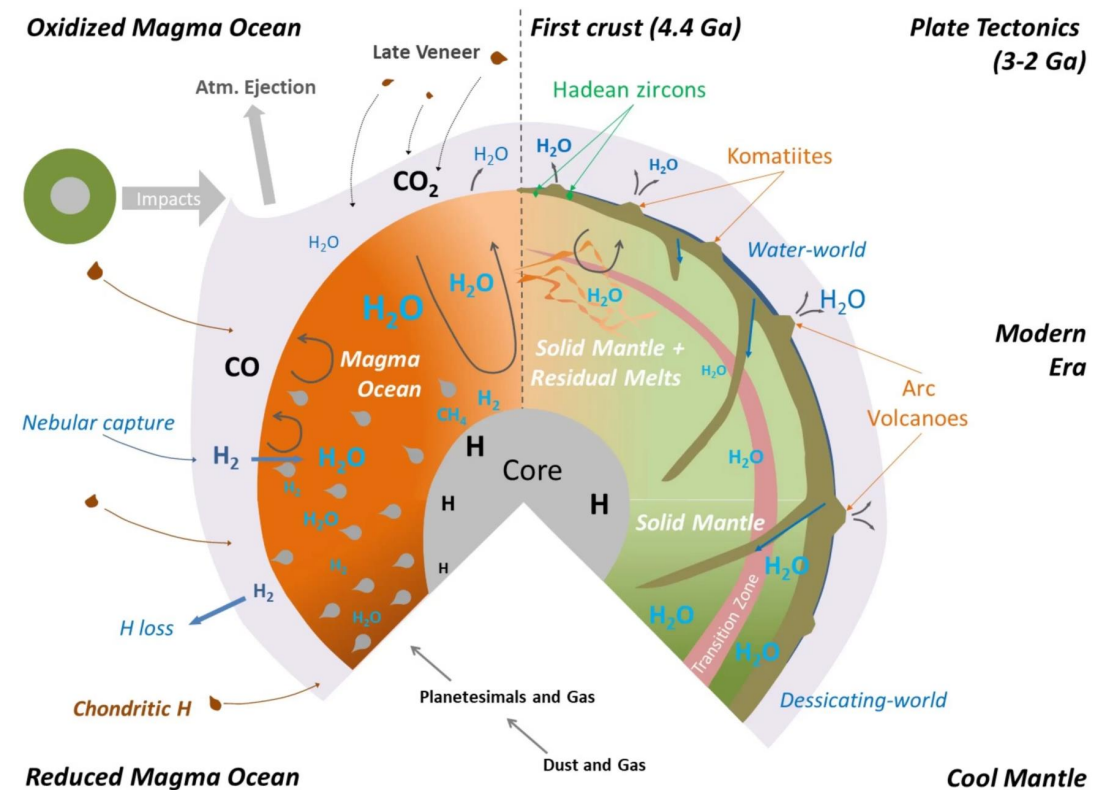
La formation de l'atmosphère et de l'hydrosphère

- **Dégazage** : La chaleur interne et l'activité volcanique ont libéré des gaz (CO_2 , H_2O , N_2) qui ont formé l'atmosphère primitive et l'hydrosphère (océans).
- **Effet de serre** : L'atmosphère a retenu suffisamment de chaleur grâce aux gaz à effet de serre, maintenant des températures permettant l'eau liquide, indispensable à la vie.

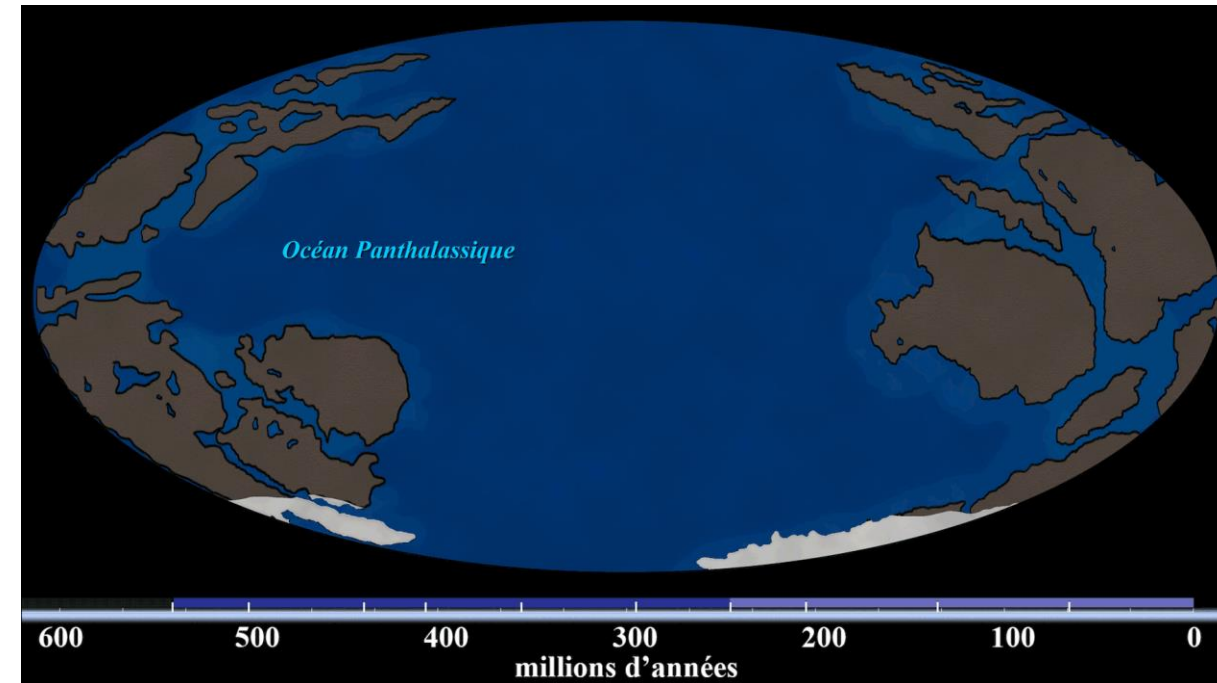


Le rôle des plaques tectoniques pour maintenir l'habitabilité de la terre

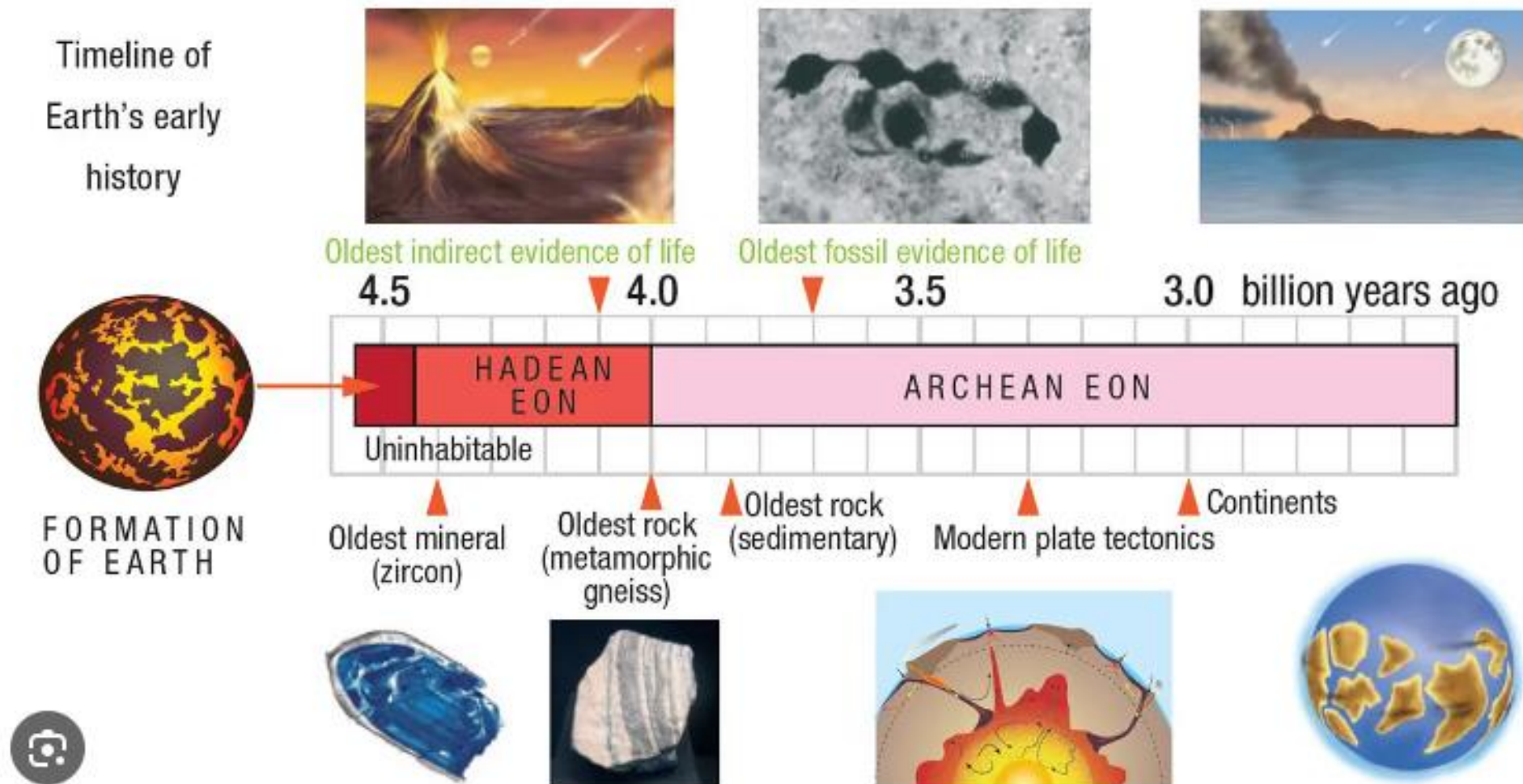
- Vers 3 milliards d'années, la Terre aurait atteint un stade où la croûte s'est suffisamment refroidie et épaissie pour former des plaques distinctes.
- Ce processus a permis le développement de la tectonique des plaques, avec des plaques mobiles flottant sur le manteau partiellement liquide.
- L'apparition des plaques tectoniques a marqué le début de plusieurs processus qui stabiliseront les conditions de la Terre, notamment le cycle du carbone, le dégazage volcanique, et l'altération chimique des roches.
- Cette structure géologique dynamique permet un **recyclage constant** des éléments essentiels et contribue à la régulation de l'atmosphère et du climat.

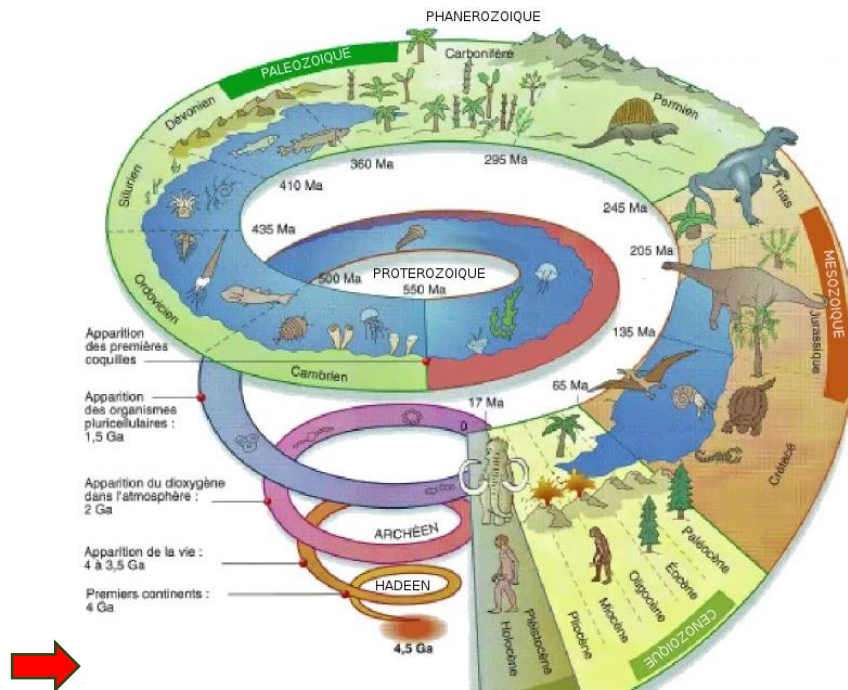


- Au cours de l'histoire de la Terre, plusieurs supercontinents se sont formés (ex. Rodinia, Pannotia, Pangée), puis fragmentés.
- Ces cycles de formation et de rupture influencent la circulation océanique et atmosphérique, ce qui régule le climat global.
- Le déplacement des plaques et la formation de nouvelles zones géologiques (comme les chaînes de montagnes et les bassins océaniques) influencent les **cycles biogéochimiques** essentiels, comme le cycle du carbone, de l'azote et du phosphore
- Le cycle des continents, en influençant le climat, en favorisant la diversité écologique, et en recyclant les nutriments, a joué un rôle fondamental dans l'habitabilité de la Terre et le soutien de la vie sur des milliards d'années.

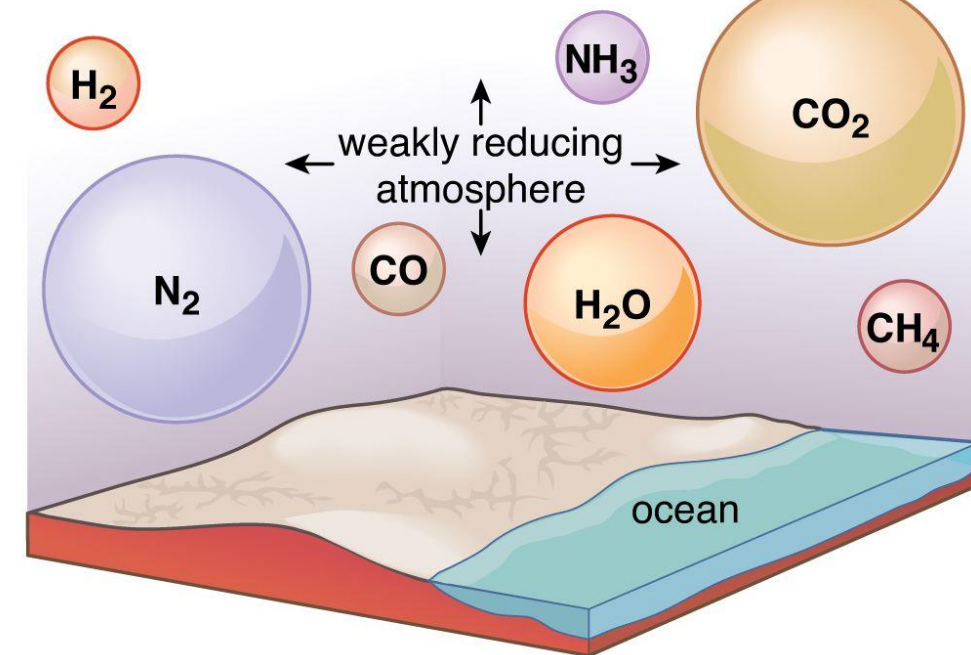


3. L'évolution de l'hydrosphère et atmosphère vers l'habitabilité



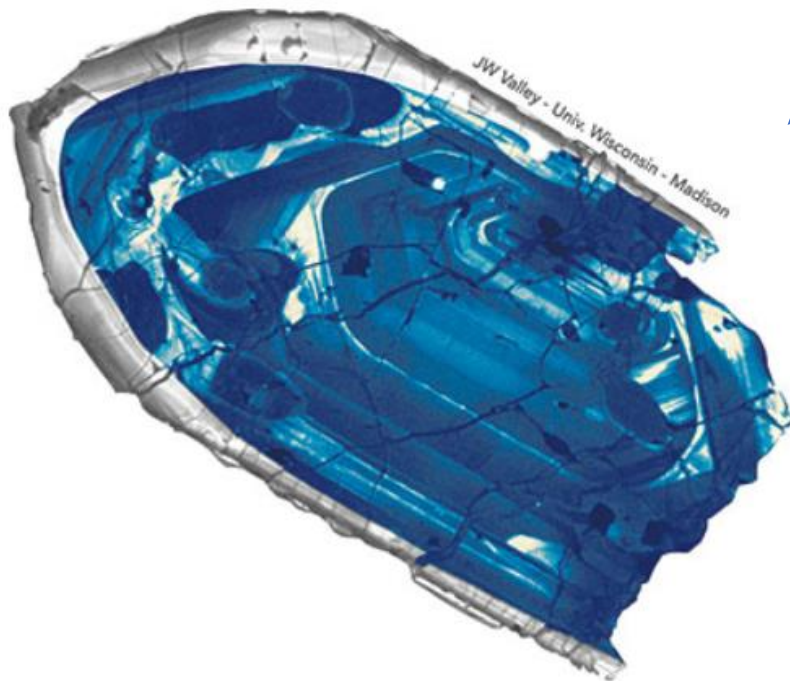


Earth's prebiotic atmosphere



- Il y a 4.5 milliards d'années, l'atmosphère est anoxique (sans oxygène) et composée de gaz volcaniques H_2O , CO_2 et H_2S

La formation des océans: l'eau était probablement déjà présente il y a 4,4 milliards d'années.



Les zircons de Jack Hills

- La croûte primordiale a été détruite par l'érosion et la tectonique des plaques.
- Les zircons ont résisté à l'érosion puis se sont accumulés dans les roches détritiques.
- Les zircons sont enrichis en oxygène 18, compatible avec la présence d'eau à l'état liquide.

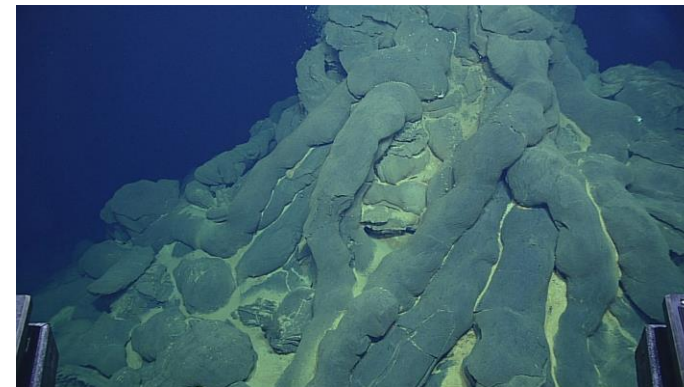
Zircon. Vu en cathodoluminescence, ce zircon d'une taille de 400 microns (0,4 mm) est le plus ancien connu, puisqu'il compte 4,4 milliards d'années.

© John Valley, University of Wisconsin

Hadean age for a post-magma-ocean zircon confirmed by atom-probe tomography

[John W. Valley](#), [Aaron J. Cavosie](#), [Takayuki Ushikubo](#), [David A. Reinhard](#), [Daniel F. Lawrence](#), [David J. Larson](#), [Peter H. Clifton](#), [Thomas F. Kelly](#), [Simon A. Wilde](#), [Desmond E. Moser](#) & [Michael J. Spicuzza](#)

[Nature Geoscience](#) **7**, 219–223 (2014) | [Cite this article](#)



Pillow lava

D'où vient l'eau?

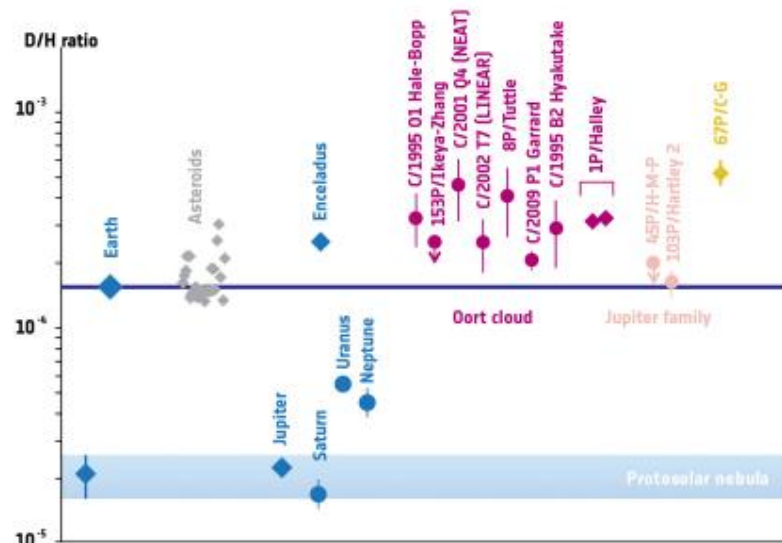
Eau apportée par Théia?

Molybdenum isotopic evidence for the late accretion of outer Solar System material to Earth

Gerrit Budde , Christoph Burkhardt & Thorsten Kleine

Nature Astronomy 3, 736–741 (2019) | [Cite this article](#)

Eau apportée par les comètes et astéroïdes?



Différentes valeurs du ratio deutérium-hydrogène (D/H) dans l'eau observées dans plusieurs corps du système solaire. ©ESA

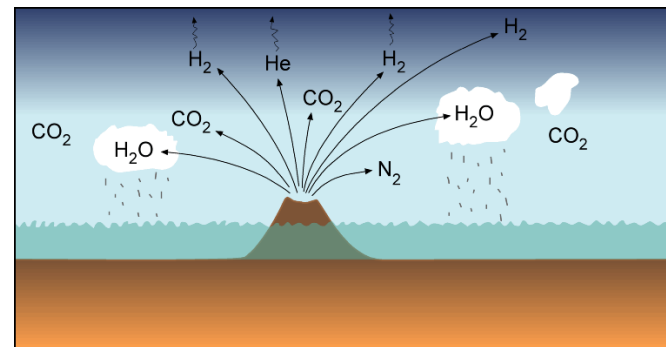
Eau présente depuis la formation de la Terre?

H et O dans les roches → H₂O provenant du dégazage de la jeune Terre en fusion

Earth's water may have been inherited from material similar to enstatite chondrite meteorites

LAURETTE PIANI , YVES MARROCCI , THOMAS RIGAUDIER , LIONEL G. VACHER, DORIAN THOMASSIN, AND BERNARD MARTY  [Authors Info & Affiliations](#)

SCIENCE • 28 Aug 2020 • Vol 369, Issue 6507 • pp. 1110-1113 • DOI:10.1126/science.aba1948



Determination of the initial hydrogen isotopic composition of the solar system

J. Aléon , D. Lévy, A. Aléon-Toppini, H. Bureau, H. Khodja & F. Brisset

Nature Astronomy 6, 458–463 (2022) | [Cite this article](#)

➔ Probablement un mélange de plusieurs theories... mais dans quelles proportions?

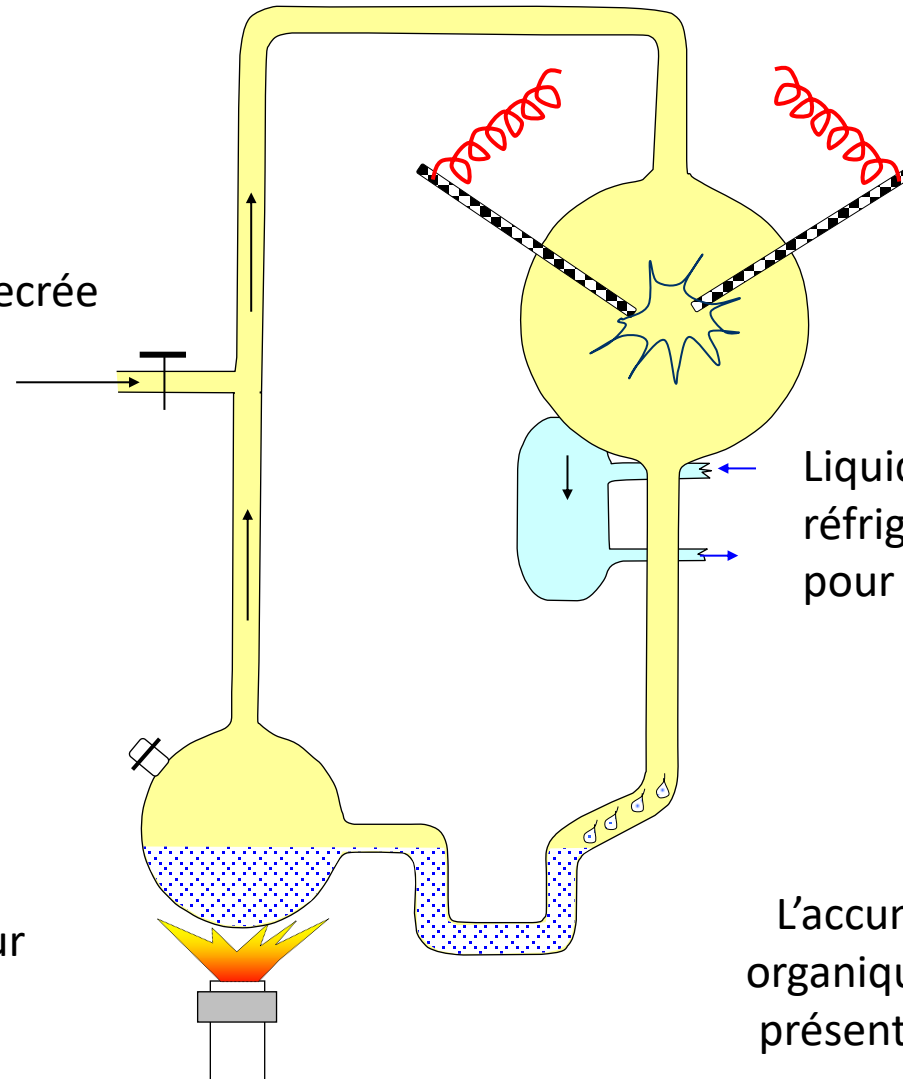
D'où vient la vie?

Miller et Urey, 1953

Théorie de la soupe primitive

Une atmosphère primitive recrée
dans un ballon de 5 litres
 H_2 , CH_4 , CO_2 , NH_3

Eau portée à
ébullition:
création de vapeur

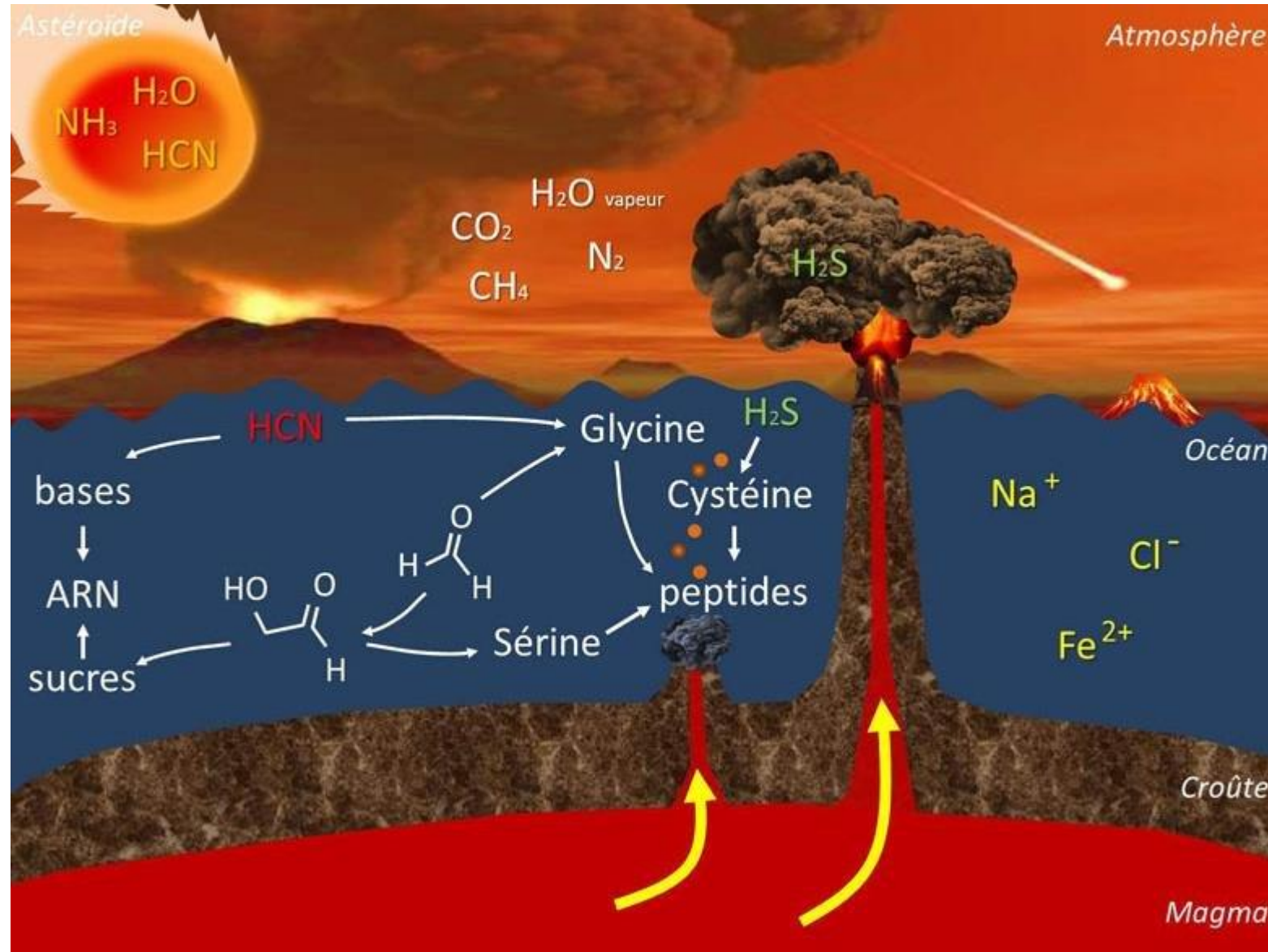


Arc électrique: 60.000 Volts
pour reproduire les
décharges des éclairs

Liquide
réfrigérant
pour refroidir

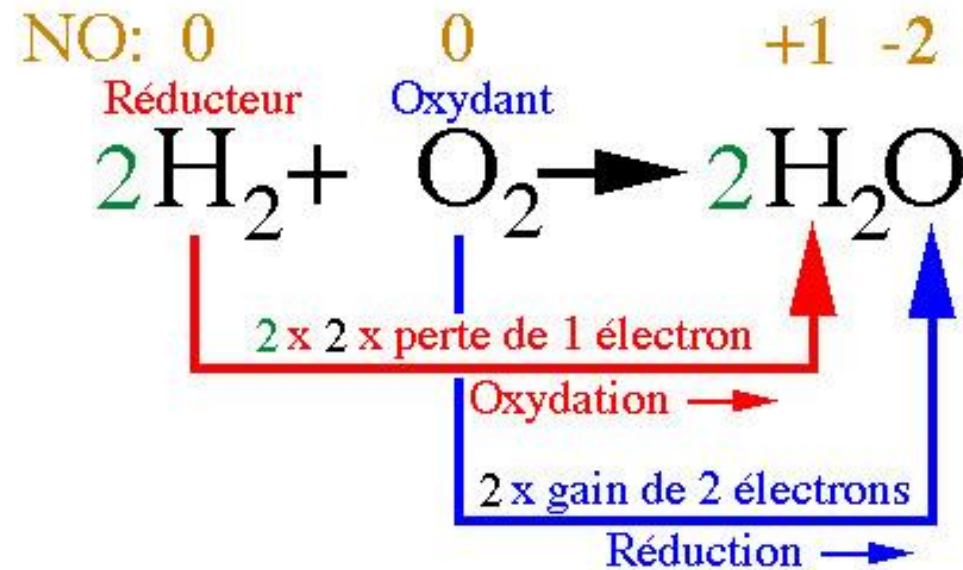
Résultat:
L'accumulation de matière
organique, des acides aminés
présents dans nos protéines

D'où vient la vie?



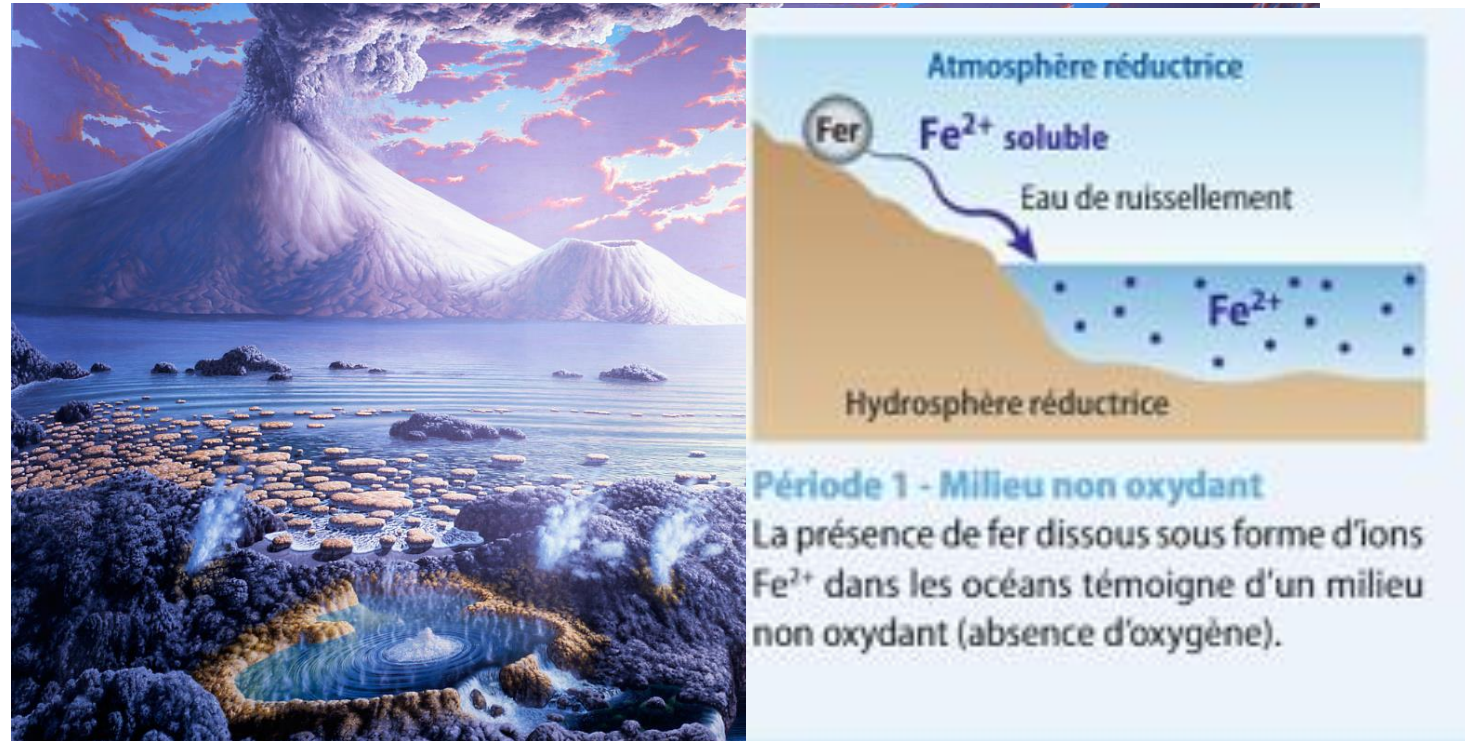
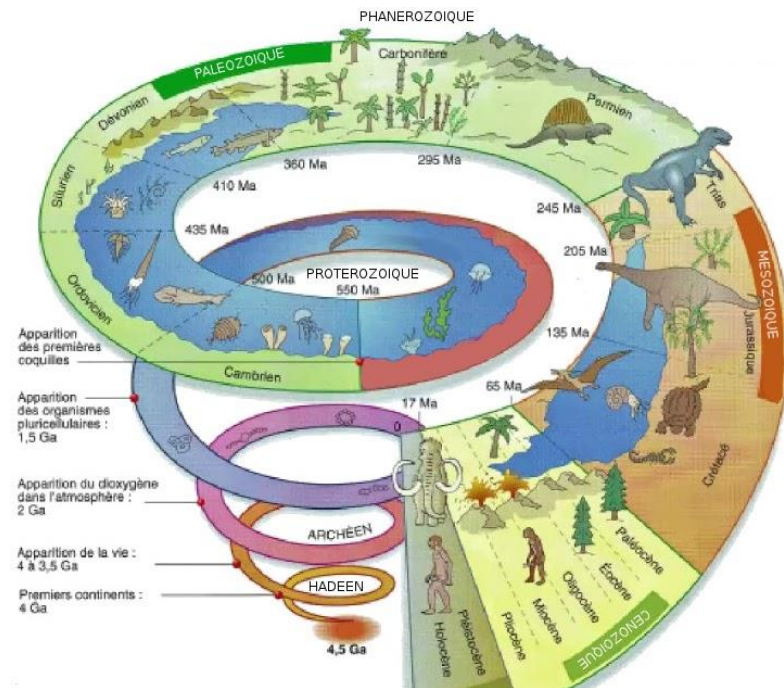
L'oxydo-réduction (ou réaction d'oxydoréduction) est un type de réaction chimique dans laquelle il y a un transfert d'électrons entre deux substances. Elle implique deux processus simultanés : l'oxydation, où une substance perd des électrons, et la réduction, où une autre substance gagne des électrons.

Par exemple, lorsque le fer (Fe) se combine avec de l'oxygène (O₂) pour former de la rouille (oxyde de fer), le fer est oxydé (il perd des électrons) et l'oxygène est réduit (il gagne des électrons).



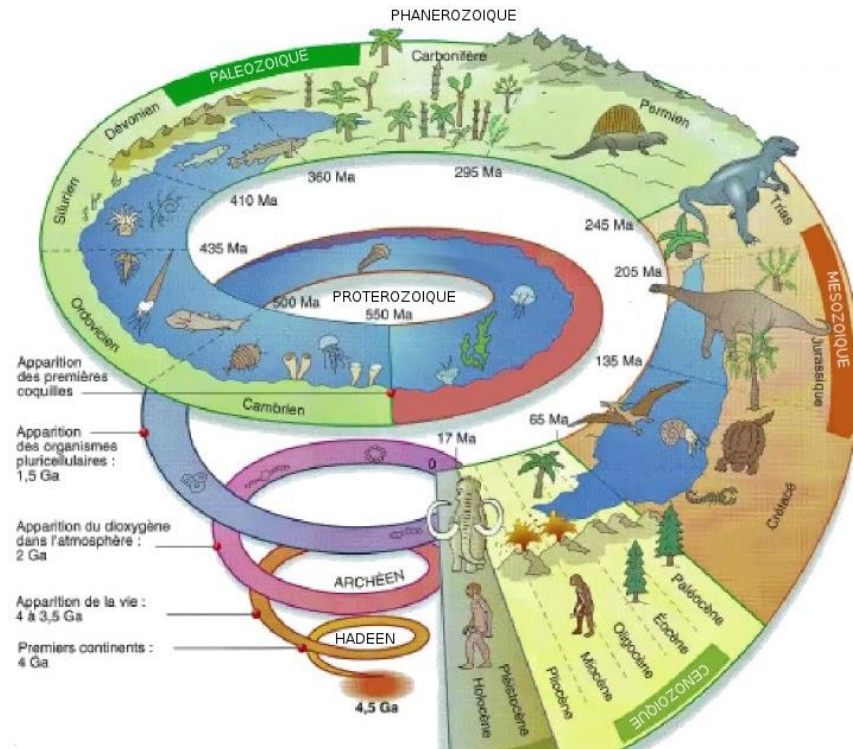
- L'habitabilité de la Terre évolue en effet grâce aux réactions d'oxydo-réduction qui se produisent lors des interactions entre la géosphère, l'atmosphère, l'hydrosphère et la biosphère

La chimiosynthèse est un processus biologique par lequel certains micro-organismes produisent de l'énergie à partir de réactions chimiques, sans utiliser la lumière solaire mais en oxydant des composés inorganiques réduits, tels que l'hydrogène sulfuré (H_2S) ou le méthane (CH_4).



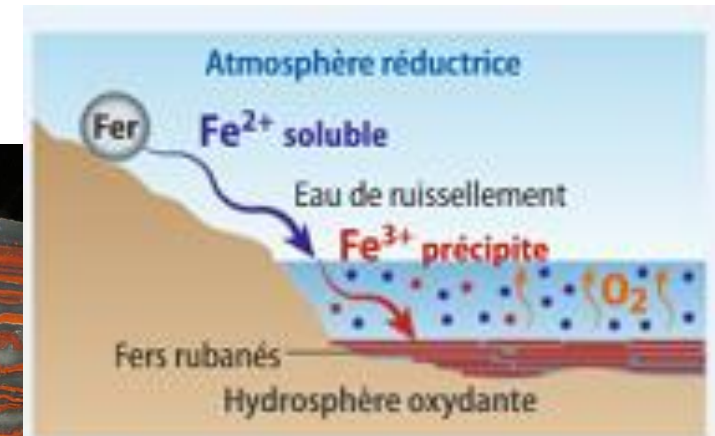
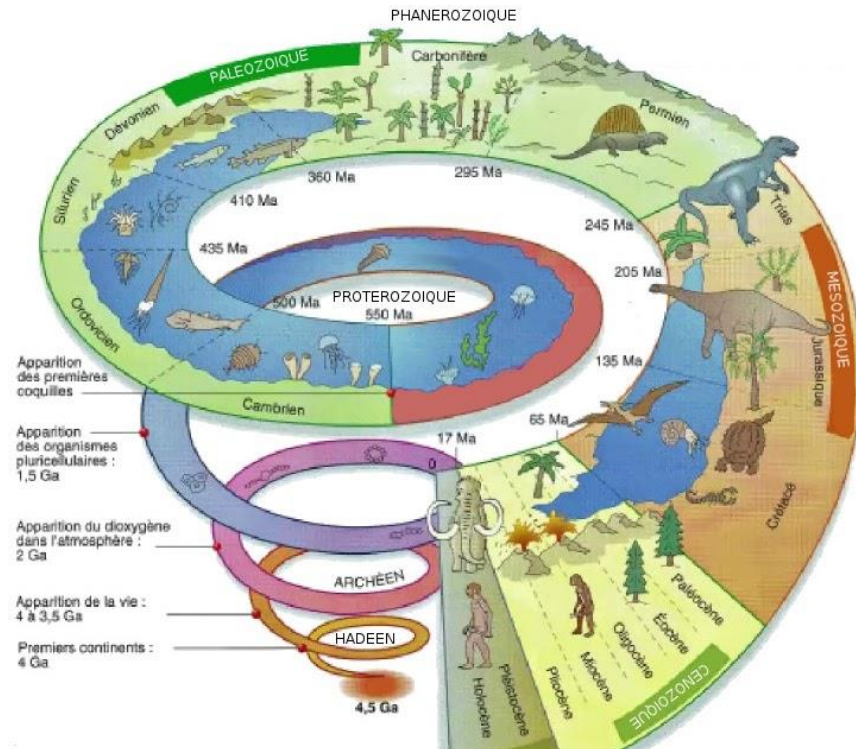
- Autour de 4.2 milliards d'années, la terre commence à refroidir et une grande part de cette eau se condense pour former des océans riches en minéraux réduits, notamment en fer dissous (sous forme de Fe^{2+}) et en sulfures.
- Des premières formes de vie rudimentaires apparaissent, des organismes unicellulaires simples, vivant autour des sources hydrothermales au fond des océans et utilisent les composés volcaniques réduits pour faire la chimiosynthèse.

La photosynthèse est le processus bioénergétique qui permet à des organismes de biosynthétiser de la matière organique en utilisant l'énergie lumineuse, l'eau et le dioxyde de carbone.



- Il y a environ 3,5 milliards d'années, une nouvelle bactérie est apparue appelé cyanobactérie, capable de convertir la lumière du soleil en énergie, un processus appelé la photosynthèse produisant de l'oxygène (un puissant oxydant)

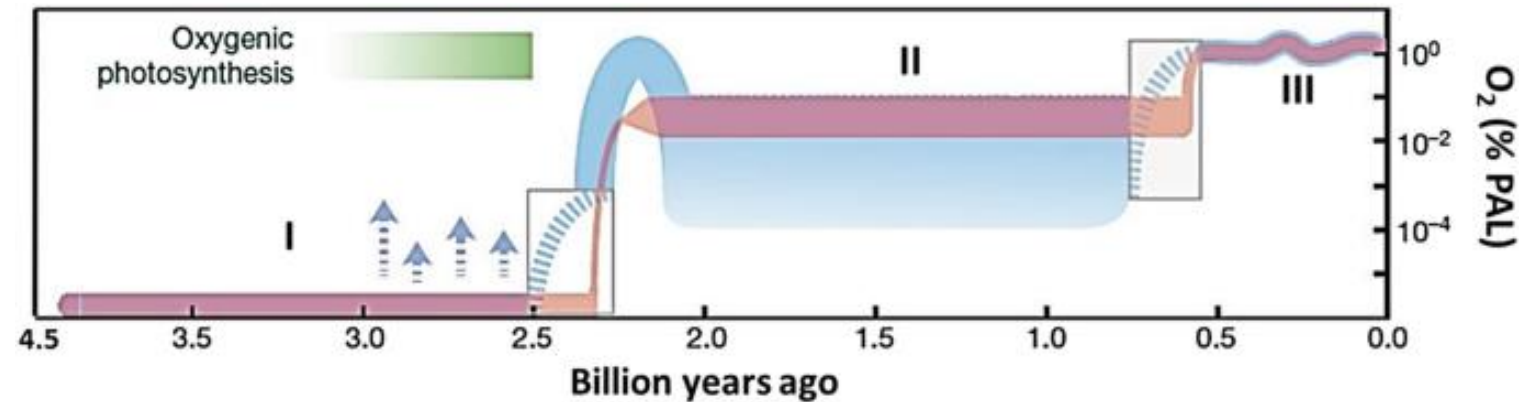
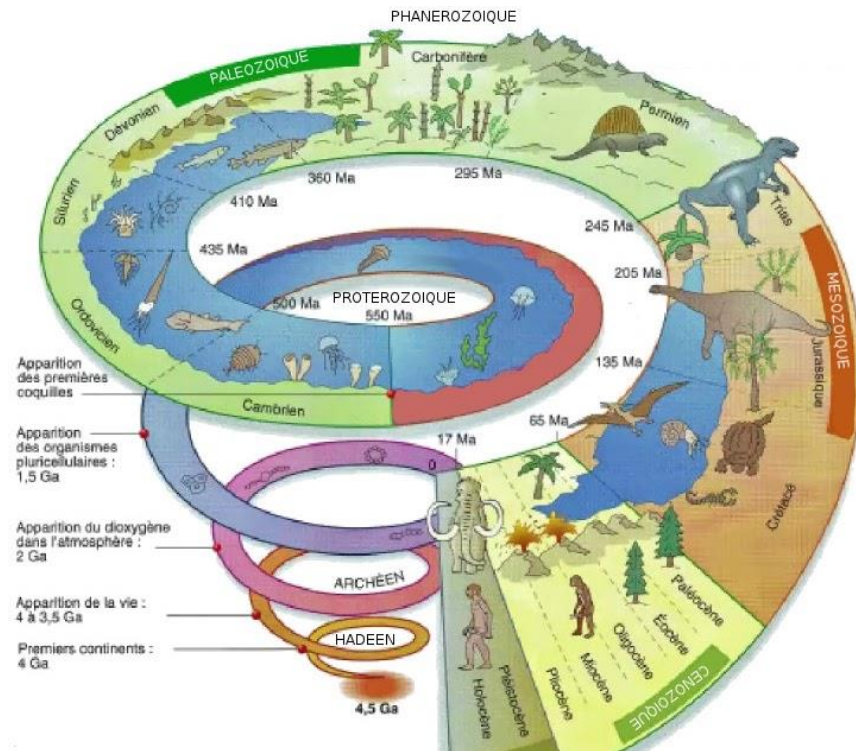
Les **fers rubanés**, ou **Banded Iron Formations (BIFs)** en anglais, sont des formations géologiques caractérisées par des couches alternées de silice (sous forme de jaspe ou de chert) et de minéraux de fer, principalement de l'hématite (Fe_2O_3) et de la magnétite (Fe_3O_4).

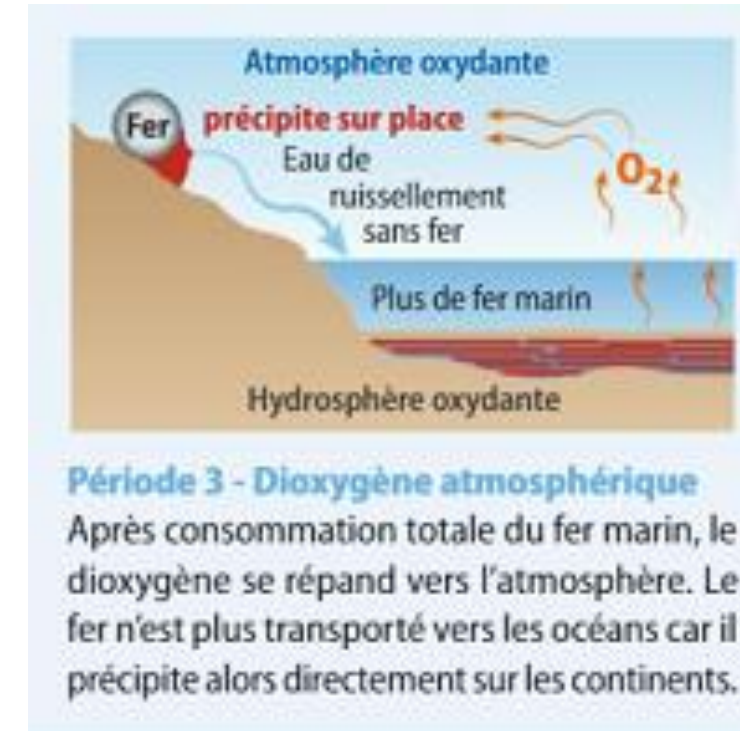
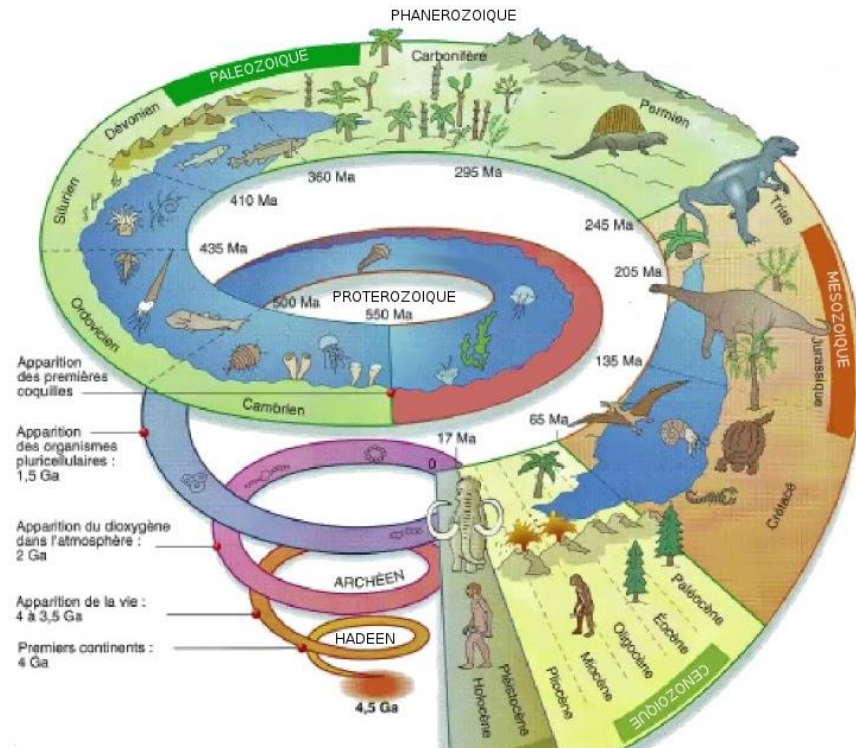


Période 2 - Oxydation dans les océans
Un processus à l'origine d'un dégagement de dioxygène dans les océans entraîne une oxydation des ions Fe^{2+} en ions Fe^{3+} peu solubles, qui précipitent et sont sédimentés.

- Par cette photosynthèse, la composition de l'océan a commencé à changer : l'océan s'est enrichi en O_2 et, parallèlement, appauvri en CO_2 et en Fer
- Cet O_2 a progressivement oxydé l'énorme quantité de fer réduit (Fe^{2+}) contenu dans l'océan et les roches pour former du fer oxydé rouge (Fe^{3+}) qui a entraîné la formation des formations de fers rubanés.

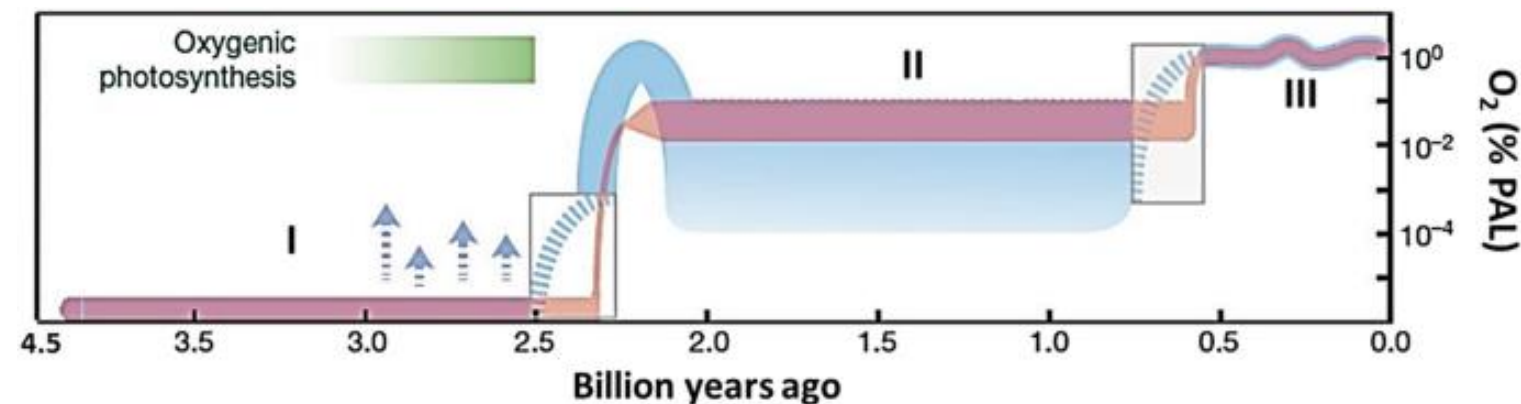
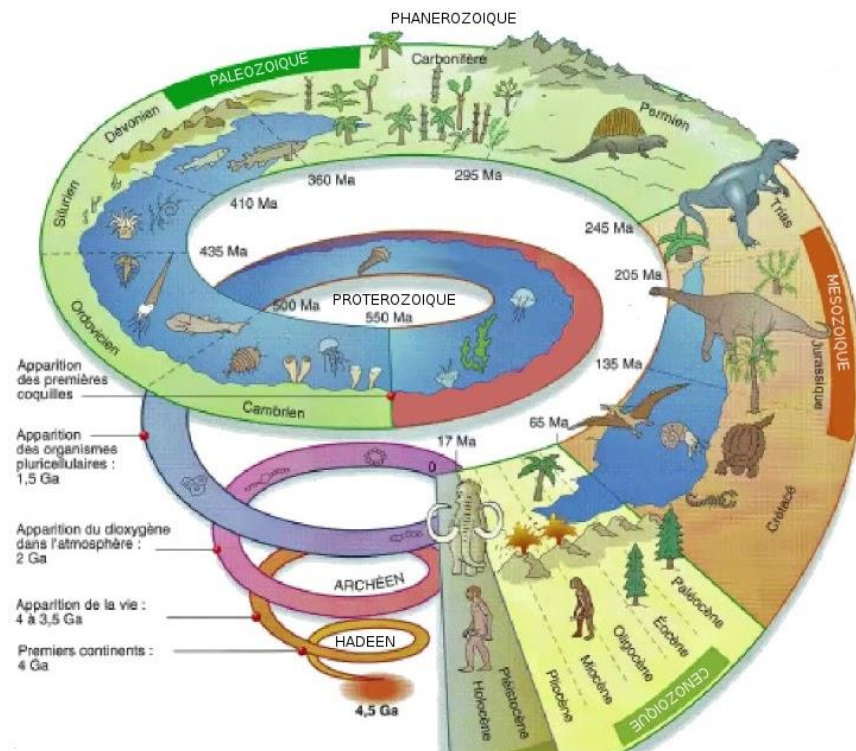
La Grande Oxygénation (Great Oxygenation Event en anglais, ou GOE) est un événement majeur qui s'est produit dans l'atmosphère terrestre, les eaux de surface et la biosphère il y a environ 2,4 à 2 milliards d'années (Ga): le dioxygène est devenu un constituant notable de l'atmosphère, il s'est accumulé à l'état dissous dans les eaux, une majeure partie des sols se sont oxydés, et les organismes anaérobies ont dû s'adapter à ces nouvelles conditions aérobies





L'oxygène est un gaz très réactif, et son accumulation dans l'atmosphère a permis:

- La respiration et la formation d'organismes plus complexe
- L'oxygénation des océans avec un océan oxygéné en surface pour l'apparition d'une vie complexe
- La formation de la couche d'ozone (O_3), qui protège la surface de Terre des rayons ultraviolets du soleil, permettant ainsi à la vie terrestre de se diversifier dans cet environnement.
- L'oxydation du méthane, un gaz à effet de serre puissant, contribuant à réduire l'effet de serre et diminuer la température sur la Terre.



- Entre 2,2 milliards et 1 milliard d'années, l'atmosphère et les océans de la Terre restent pratiquement inchangés même si les bactéries continuent à produire de l'oxygène mais il n'y en a pas assez pour la vie sur les continents.
- Au Néoprotérozoïque, entre 1 milliard et 500 millions d'années, la Terre traverse alors une période de bouleversements climatiques intenses, marquée par plusieurs épisodes de "Terre boule de glace" où notre planète est presque entièrement recouverte de glace.
- Ces périodes glaciaires extrêmes ont un impact profond sur la géochimie des océans et de l'atmosphère mais aussi la biosphère et l'apparition de la vie complexe dans les océans et sur les continents.

Comment les animaux seraient apparus'

Des analyses de roches australiennes proposent un nouveau scénario qui a vu l'émergence des premiers eucaryotes, organismes unicellulaires ou pluricellulaires dotés d'un noyau.



-730 MILLIONS D'ANNÉES

Un seul supercontinent, la Rodinia, regroupe toutes les terres émergées. L'océan est habité par des formes de vie bactériennes microscopiques et unicellulaires, les procaryotes (*voir zoom*).



**-730 MILLIONS D'ANNÉES
À -717 MILLIONS D'ANNÉES**

La surface de la planète aurait gelé. C'est la « terre boule de neige », hérissée de glaciers et dont les océans sont glacés jusqu'à -2 km. Les bactéries y grouillent toujours.



À PARTIR DE -659 MILLIONS D'ANNÉES

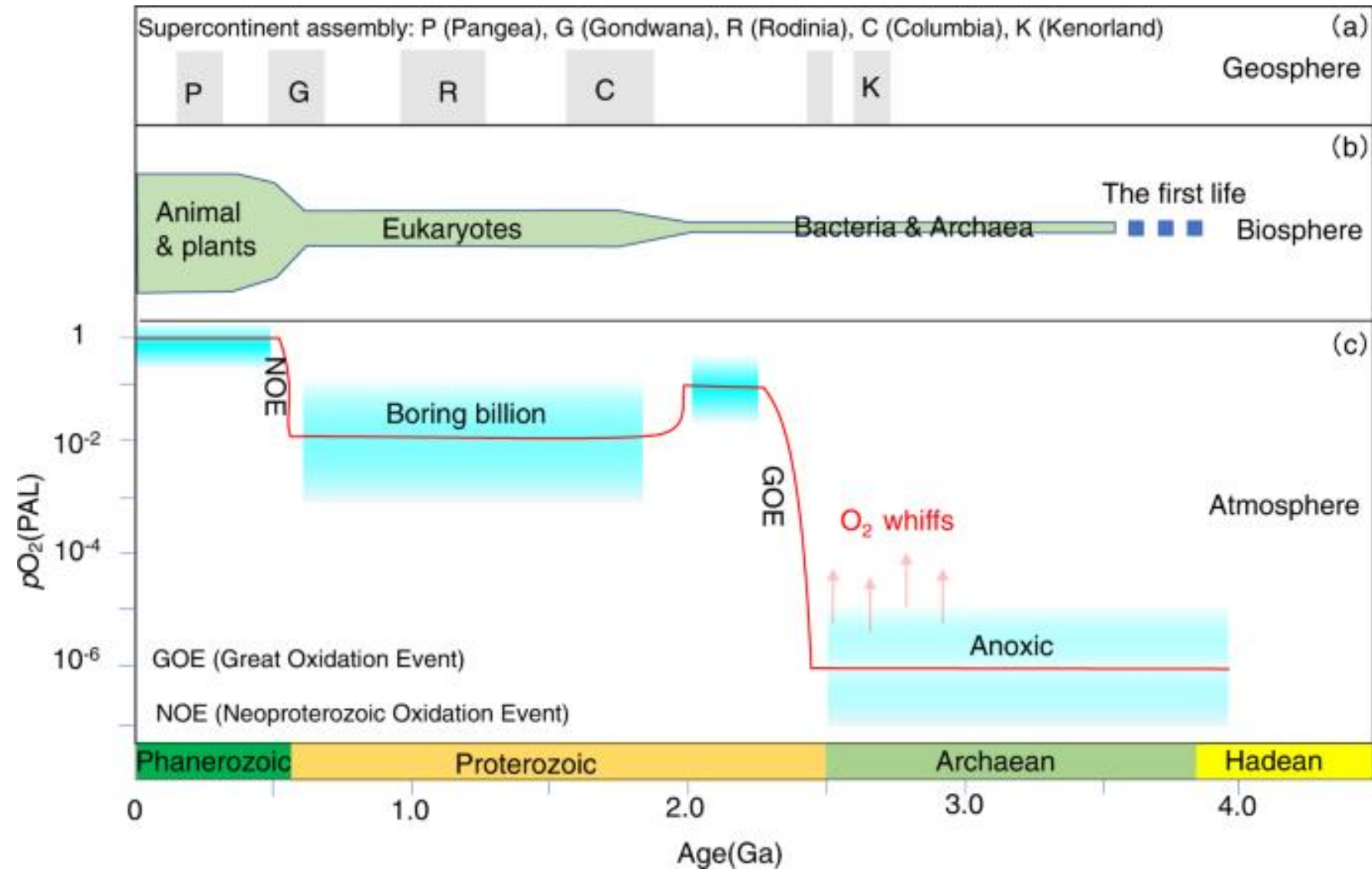
Les glaciers, dont la pression a érodé la surface des montagnes, fondent. Des torrents de nutriments (phosphore, etc.) se déversent dans la mer. Ce flux apporte une nouvelle source d'énergie.

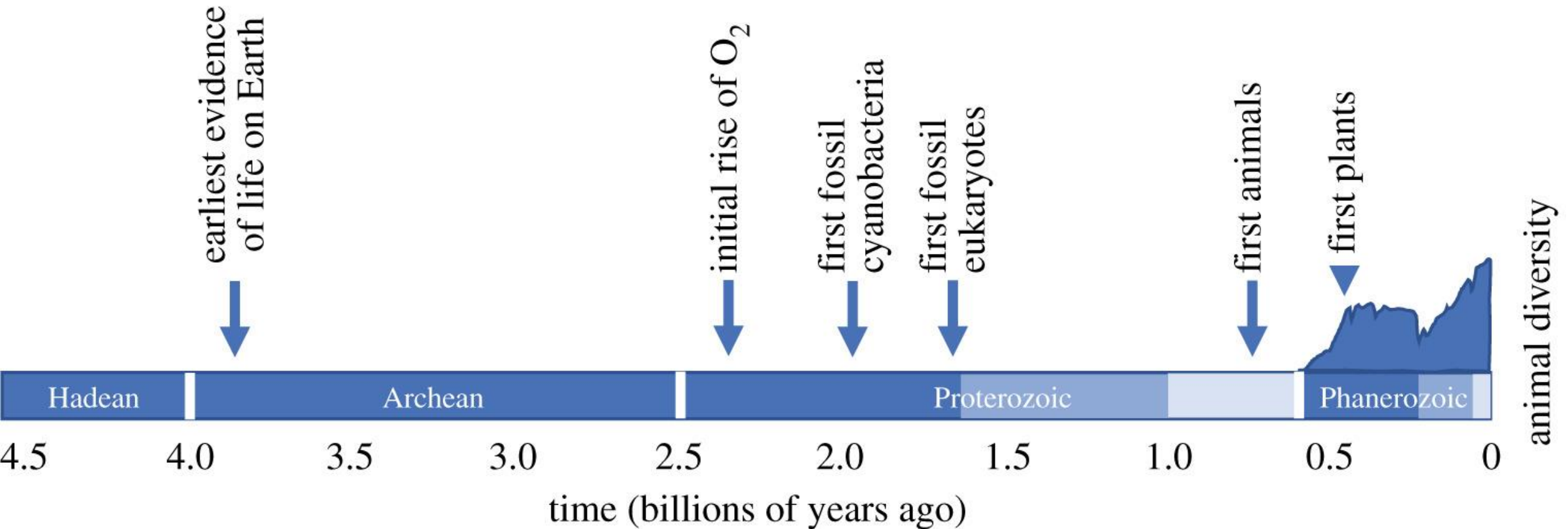


-610 MILLIONS D'ANNÉES

Les bactéries utilisent cette énergie nouvelle. C'est le bloom des premières formes de vie algo-bactériennes qui à leur tour serviront de base alimentaire à des organismes plus complexes. R. M.

- La terre boule de glace permet une érosion accélérée avec une production de nutriments favorisant les cyanobactéries qui produisent de l'oxygène en grande quantité.
- À mesure que la photosynthèse augmente, les niveaux d'oxygène dans l'atmosphère grimpent.





- le Phanérozoïque est considéré comme un âge d'or pour l'habitabilité terrestre car il a réuni des conditions favorables et stables qui ont permis une biodiversité riche, une atmosphère protectrice, et des cycles biogéochimiques équilibrés. Ces facteurs ont offert une période de prospérité pour la vie, avec une dynamique évolutive qui a conduit à la diversité d'écosystèmes que l'on observe aujourd'hui.

HISTORY OF OUR PLANET

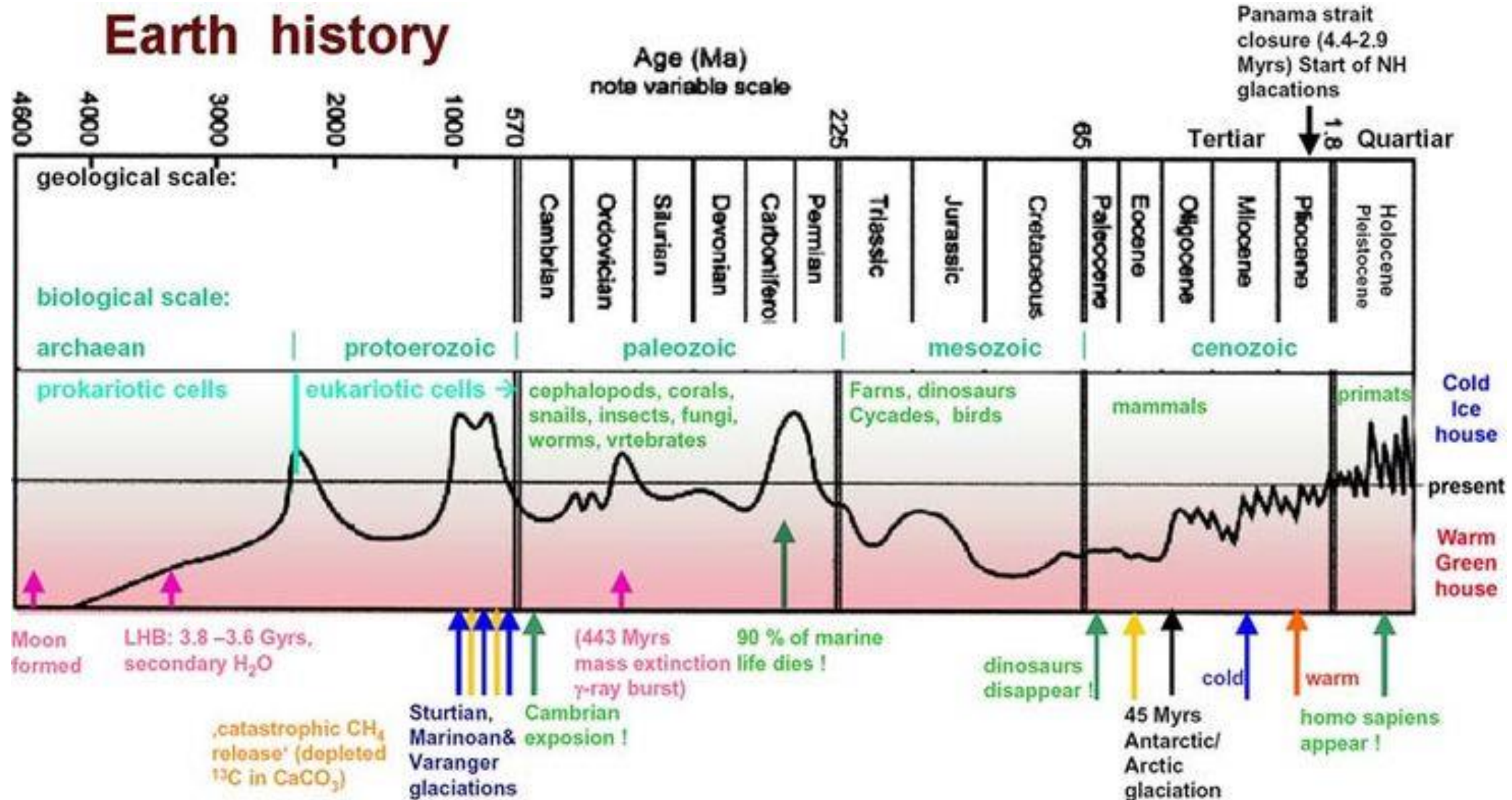
IF



4. L'évolution du climat habitable

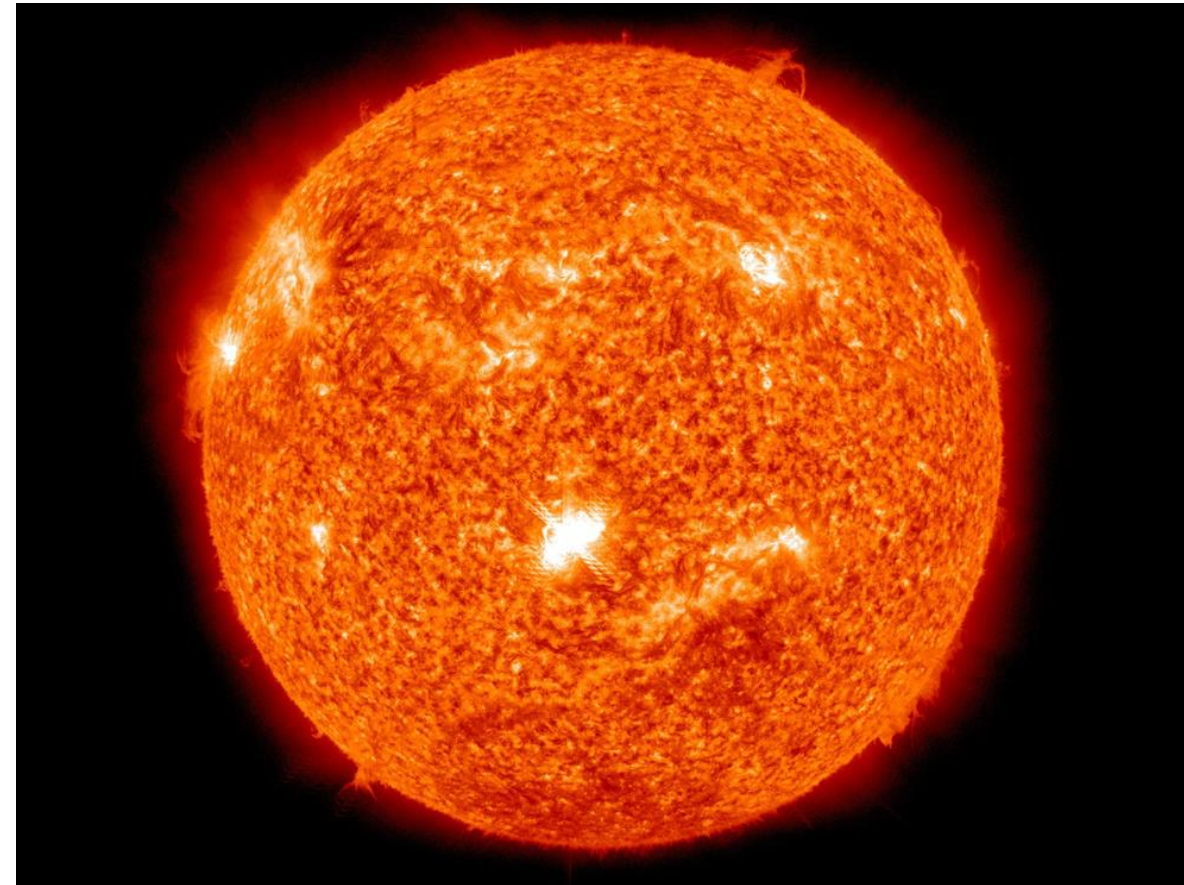


Le **climat de la terre** est resté très stable par rapport à d'autres planètes permettant un cycle de l'eau fonctionnelle tout au long de son histoire et l'apparition et évolution de la vie... Comment la terre a-t-elle maintenu ce climat habitable?



Le **bilan radiatif de la Terre** dresse un inventaire de l'énergie reçue et perdue par le système climatique de la Terre, sol-atmosphère-océans.

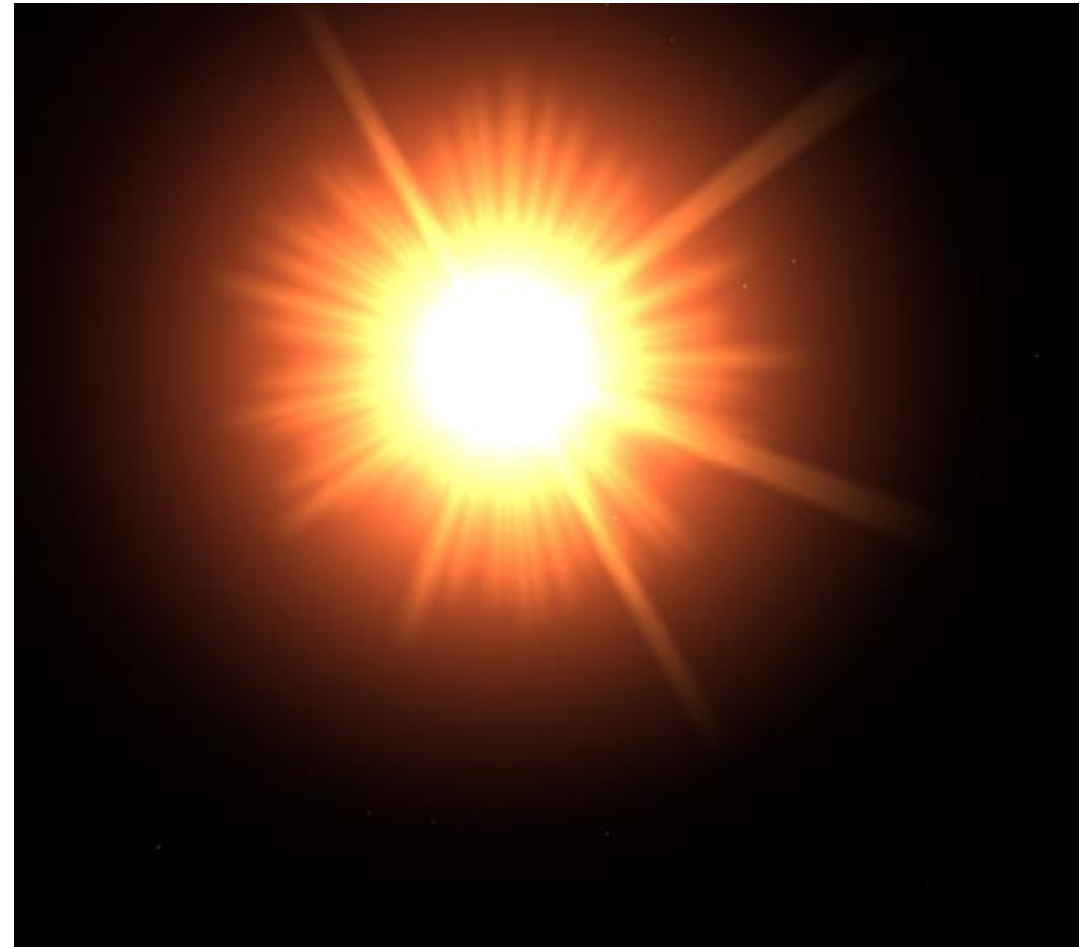
- L'apport d'énergie provient principalement du Soleil.
- Le rayonnement solaire reçu par les couches les plus élevées de l'atmosphère, ou constante solaire, est d'environ 340 W/m^2 en moyenne annuelle.



Le soleil a-t-il toujours envoyé la même quantité d'énergie?

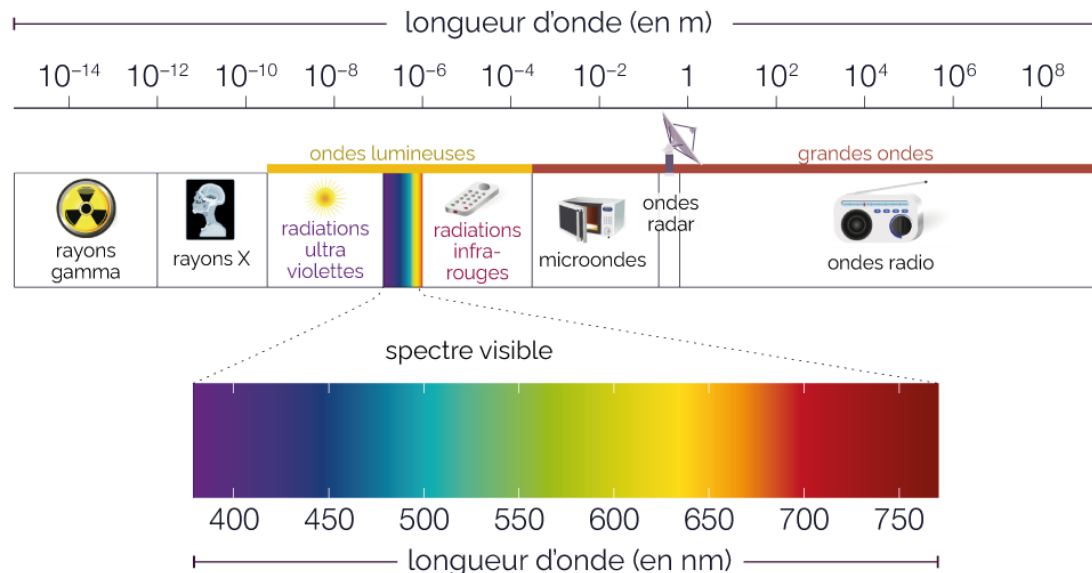
L'intensité de la lumière du Soleil, ou la luminosité solaire, a en effet changé de manière significative au cours de l'histoire de la Terre. Le Soleil s'est progressivement éclairci en vieillissant en raison de changements dans son noyau et sa production d'énergie. Ce phénomène, connu sous le nom de **paradoxe du jeune Soleil faible**

- Lorsque la Terre s'est formée il y a environ 4,5 milliards d'années, le Soleil était environ 30 % moins lumineux qu'aujourd'hui.
- Malgré cette luminosité plus faible, des preuves géologiques indiquent que la Terre primitive avait de l'eau liquide et un climat relativement chaud
- Le Soleil a progressivement augmenté en luminosité au cours de milliards d'années. Par conséquent, la Terre a reçu progressivement plus de rayonnement solaire, ce qui a influencé l'évolution de son climat.

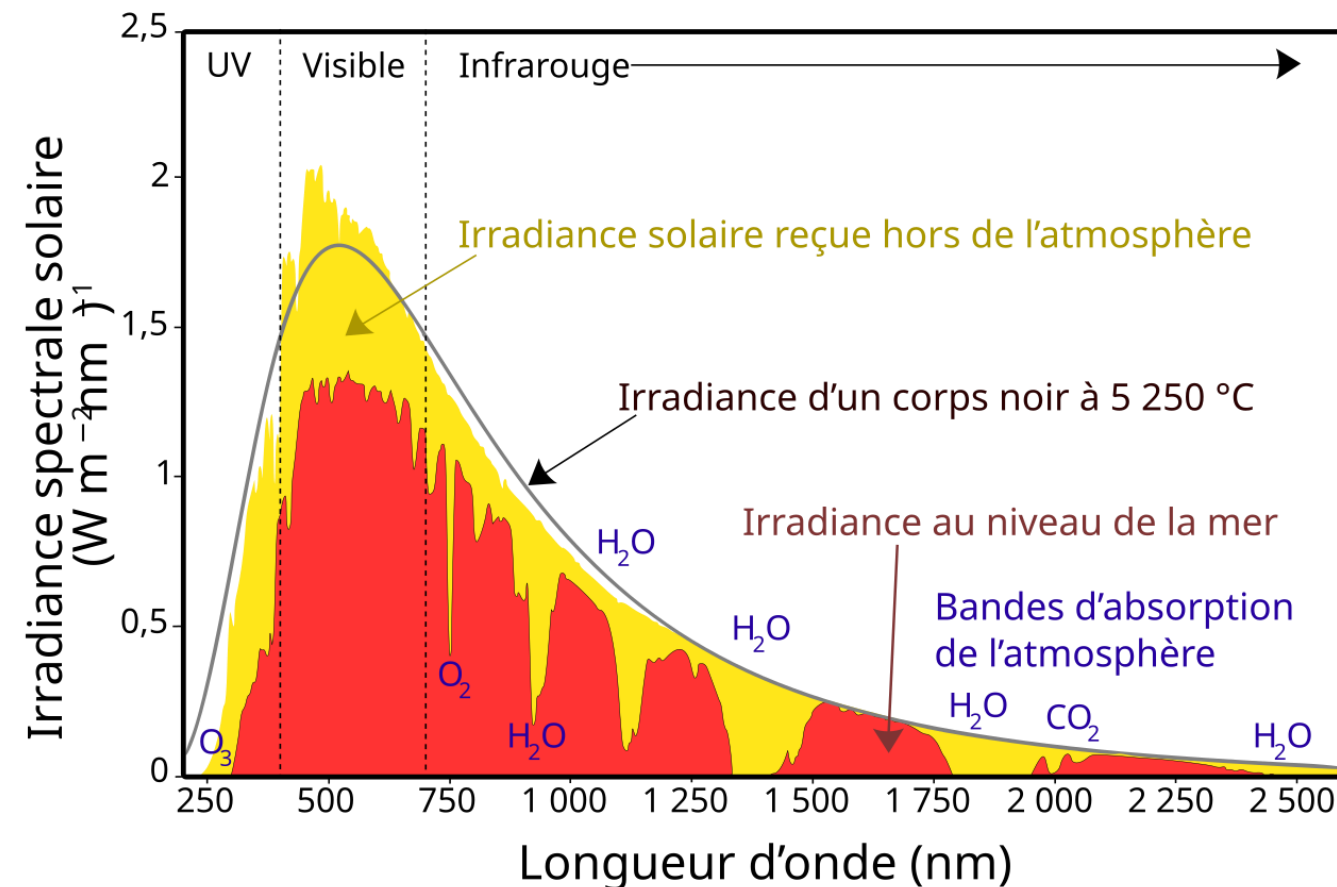


Le **rayonnement solaire** est l'ensemble des ondes électromagnétiques émises par le Soleil.

- Il est composé de toute la gamme des rayonnements, de l'ultraviolet lointain comme les rayons gamma aux ondes radio mais en grande majorité il est composé de lumière visible

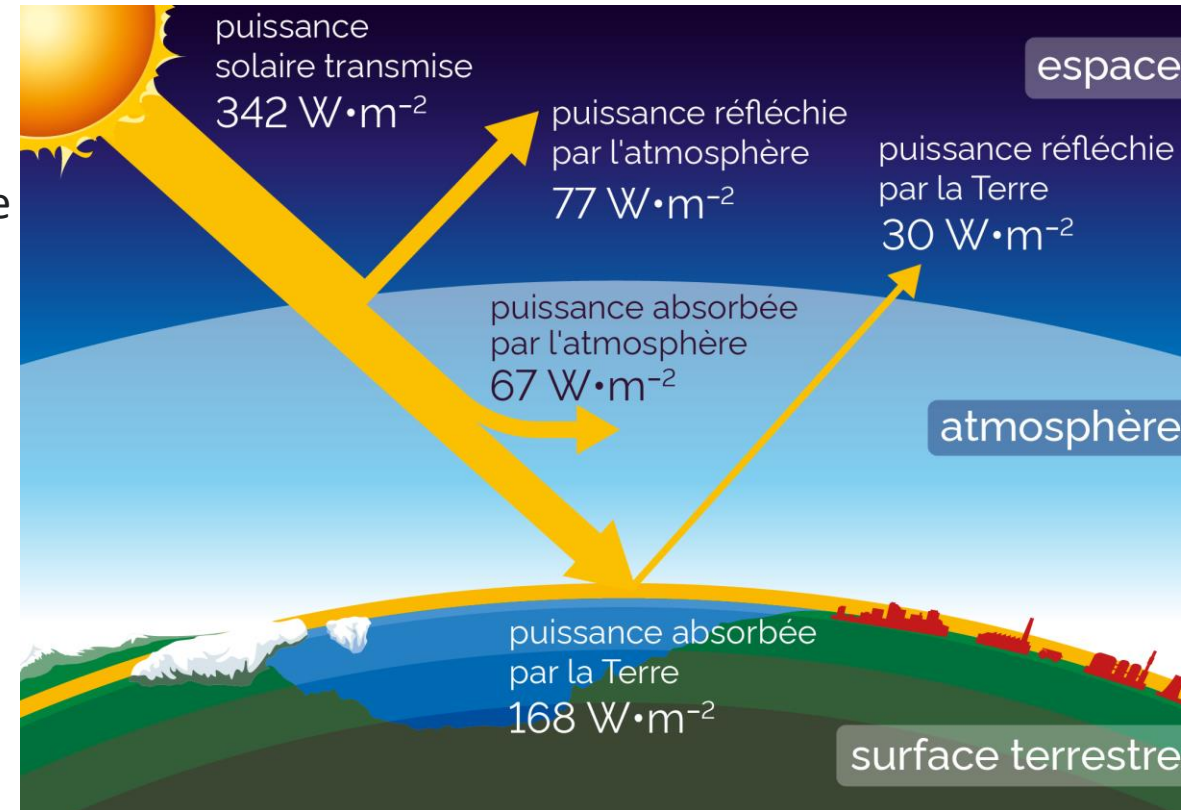


Spectre du rayonnement solaire

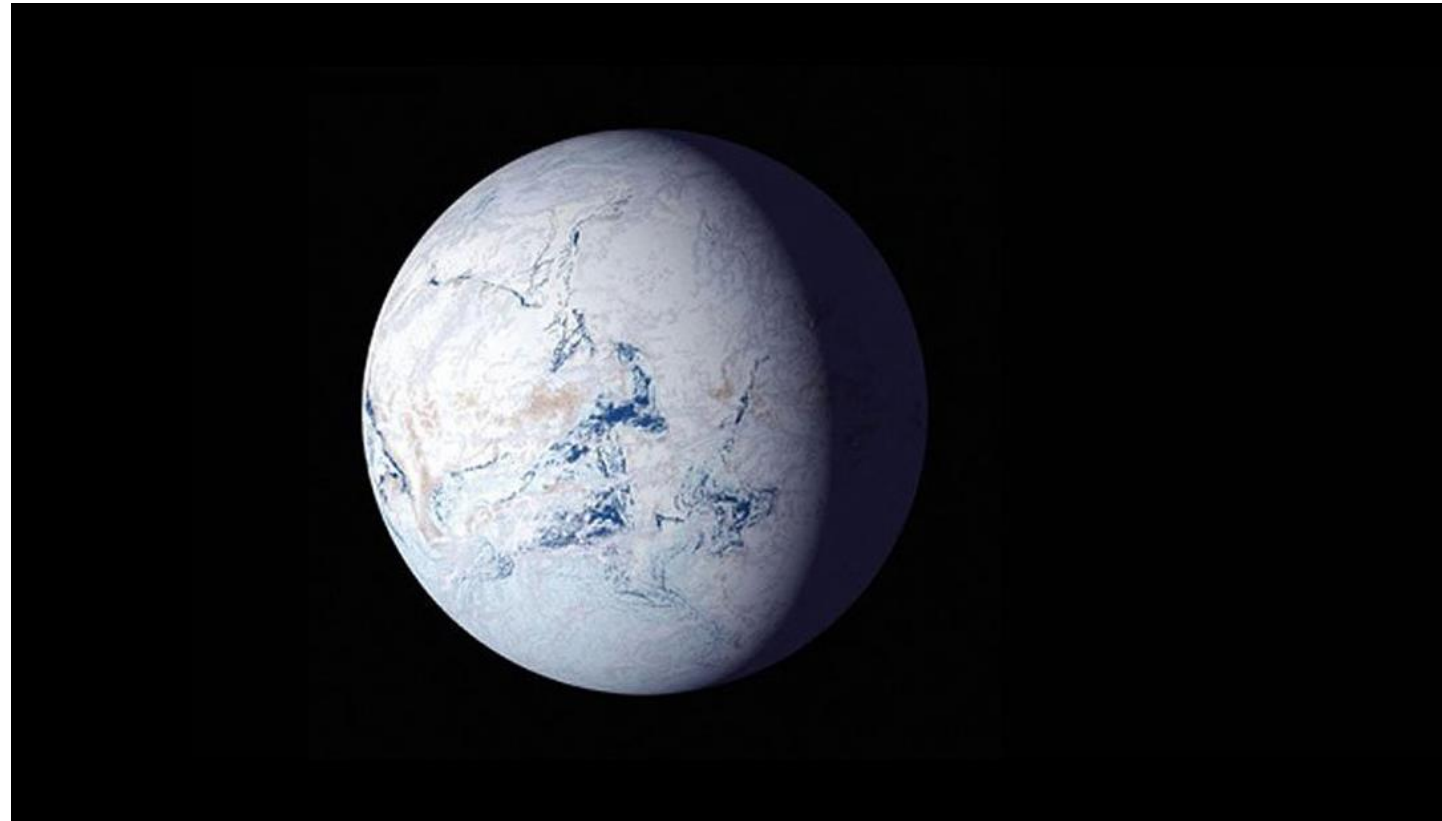


Le **bilan radiatif de la Terre** dresse un inventaire de l'énergie reçue et perdue par le système climatique de la Terre, sol-atmosphère-océans.

- 107 W m^{-2} réfléchis par l'atmosphère (77 W m^{-2}) et par la surface terrestre (30 W m^{-2}).
- 67 W m^{-2} directement absorbés dans l'atmosphère par les molécules de l'air et les nuages.
- 168 W m^{-2} absorbés par la surface terrestre (océans et continents).



- La température de la Terre est égale en moyenne à $\sim 15^{\circ}\text{C}$.
- Pourtant quand on fait le bilan radiatif, cette température devrait être bien plus basse autour de -18°C .
- Comment peut-on expliquer cette différence?
Par l'**effet de serre**.



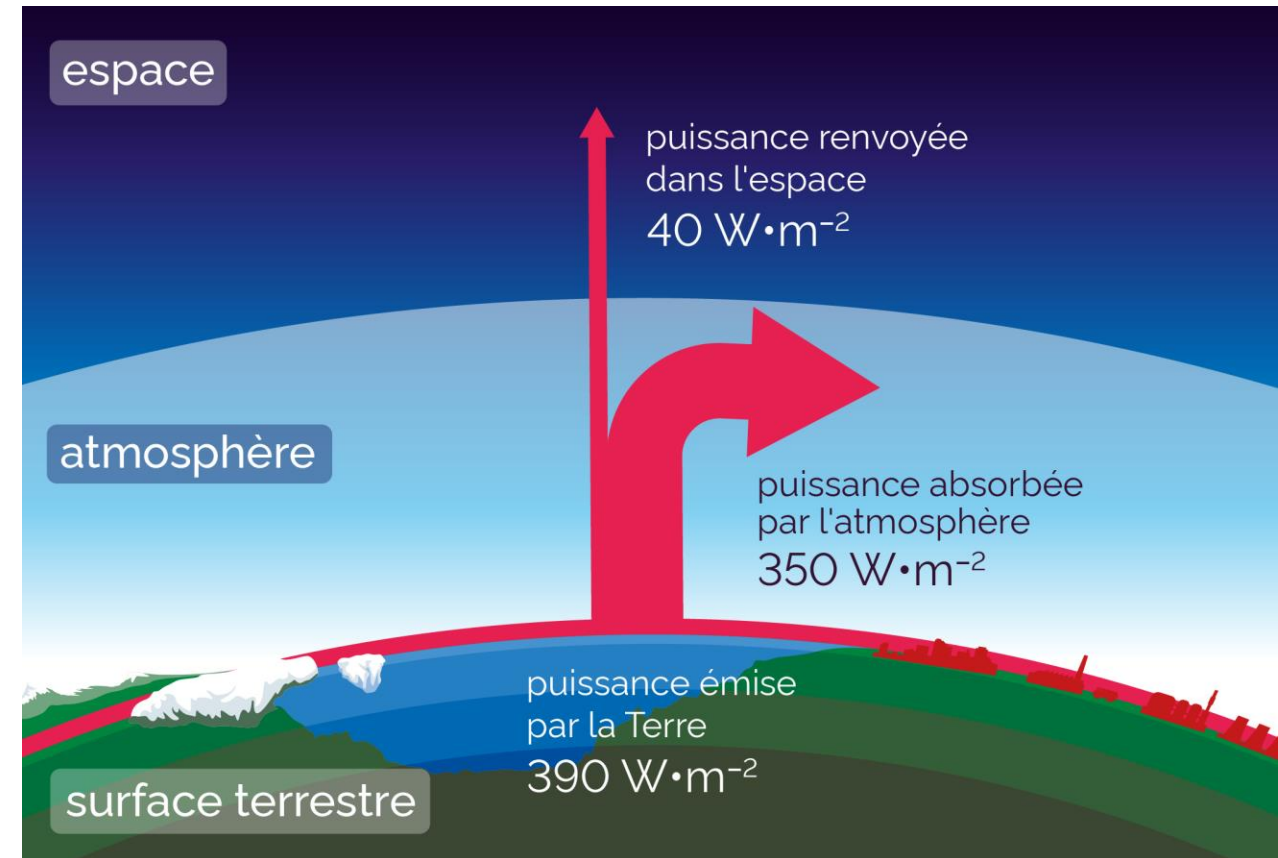
L'effet de serre "retient" de l'énergie à l'intérieur de l'atmosphère (tout comme la chaleur de votre corps est conservée dans votre sac de couchage)

L'EFFET DE SERRE

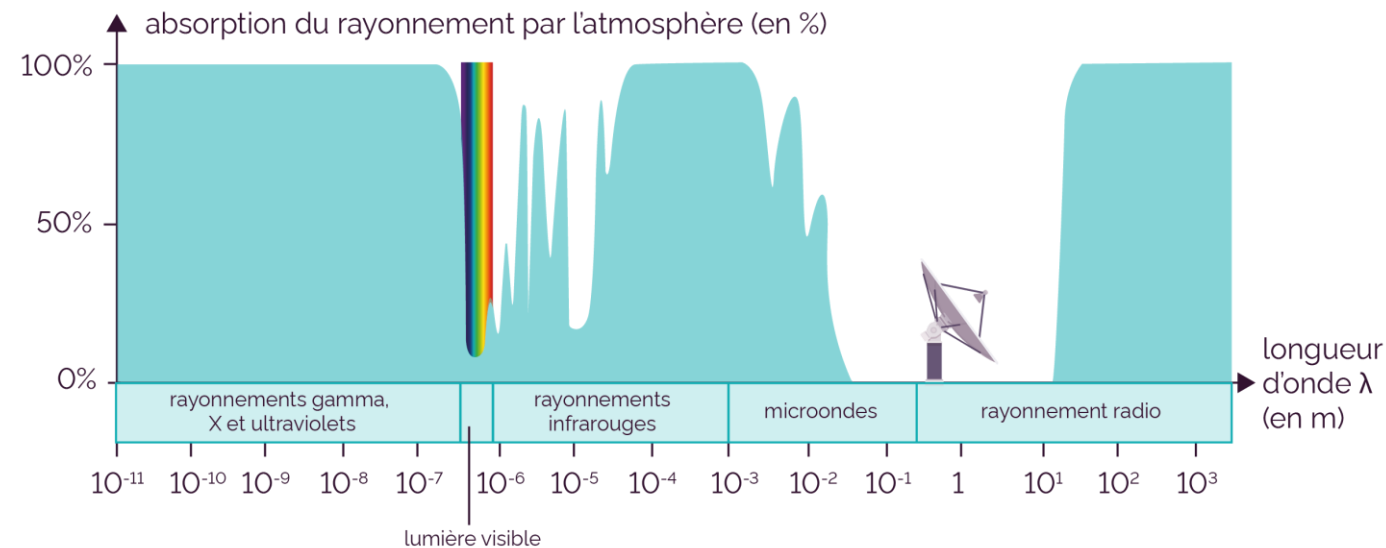
OU L'EFFET DE SAC DE COUCHAGE



- La surface de la Terre émet un rayonnement électromagnétique infrarouge
- Ce rayonnement émis est en partie absorbé par l'atmosphère et en partie envoyé dans l'espace.
- La puissance émise par unité de surface de la Terre est une fonction croissante de la température de la surface terrestre.
- La puissance moyenne émise par unité de surface est environ égale à $390 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$.
- $350 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ est absorbée par l'atmosphère et $40 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ est envoyée dans l'espace.



- L'atmosphère contient des gaz qui absorbent de manière sélective le rayonnement électromagnétique.
- En fonction de la valeur de sa longueur d'onde, le rayonnement sera très peu ou fortement absorbé
- La lumière visible est très peu absorbée par contre les infra-rouges sont très absorbés

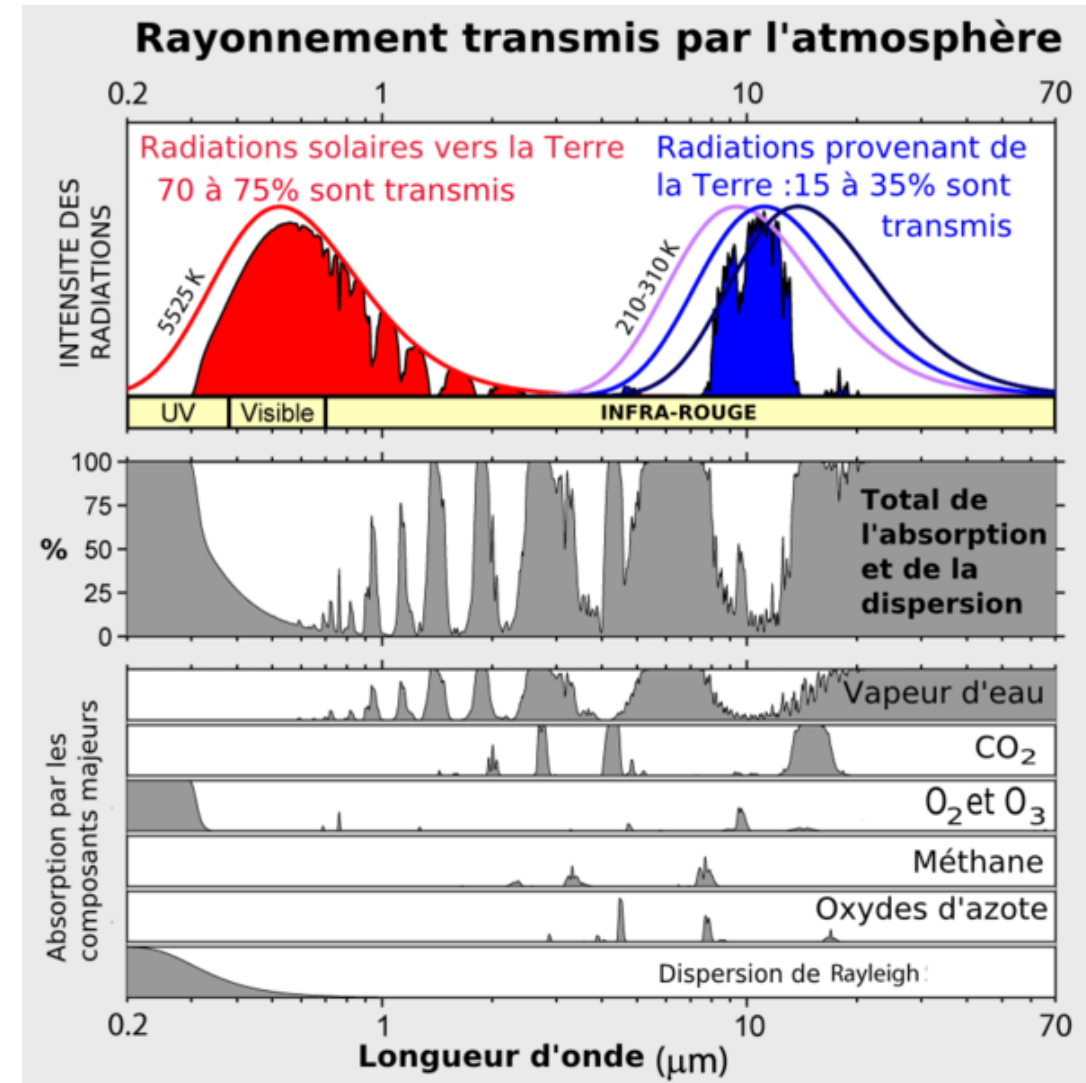
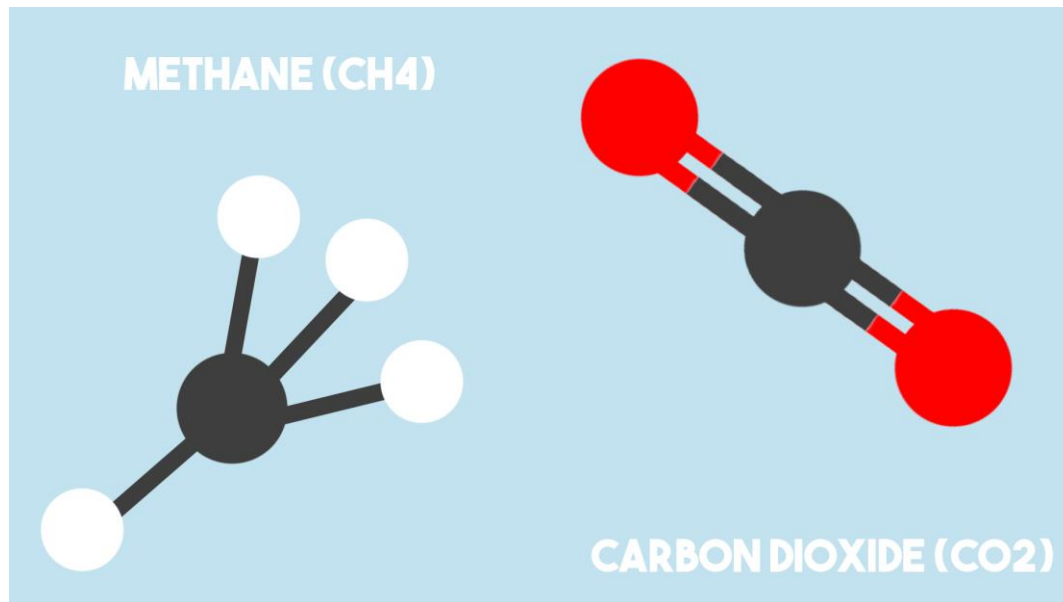


Un **gaz à effet de serre (GES)** est un gaz atmosphérique qui a la capacité d'absorber et d'émettre des rayons infrarouges, ce qui tend à retenir la chaleur dans l'atmosphère.

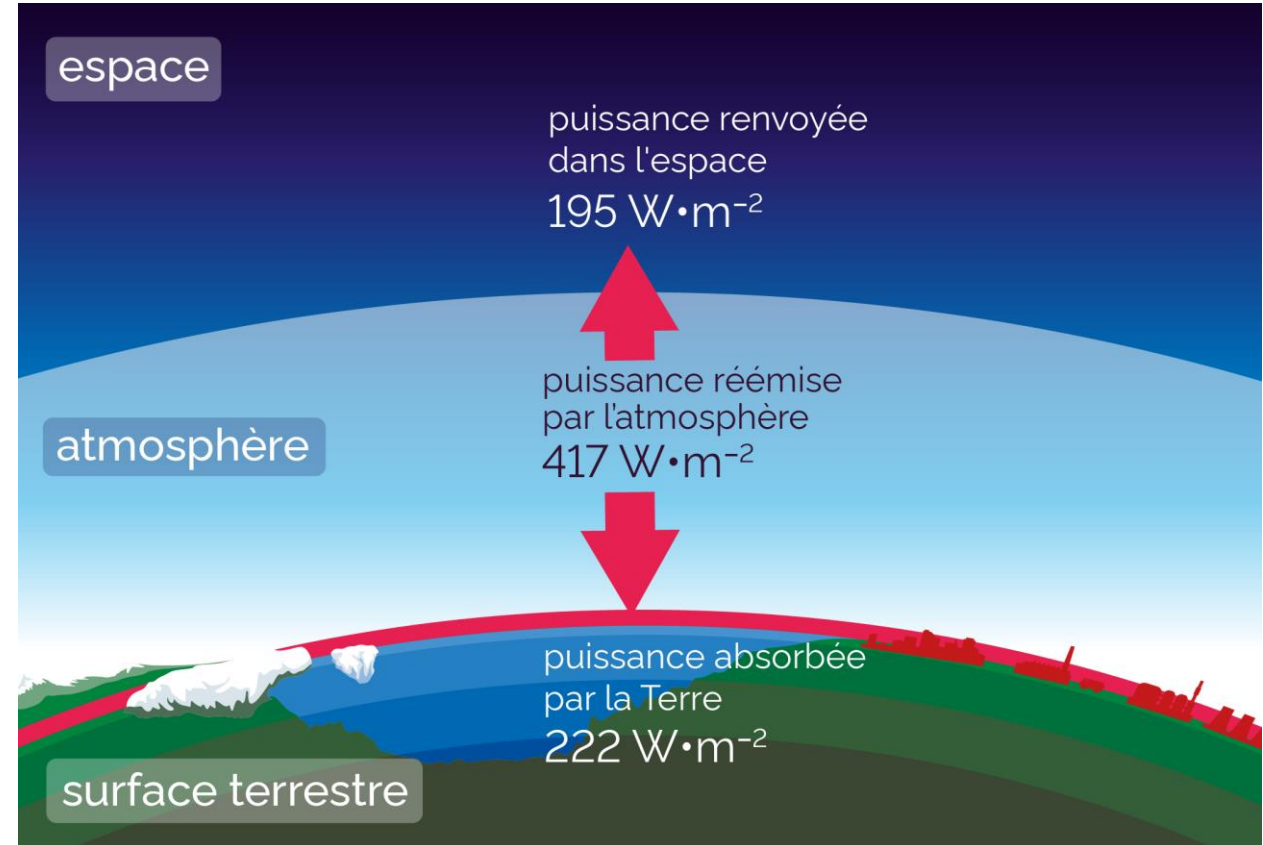
En retenant la chaleur dans l'atmosphère, les GES contribuent au phénomène **d'effet de serre**.

Les principaux gaz à effet de serre sont:

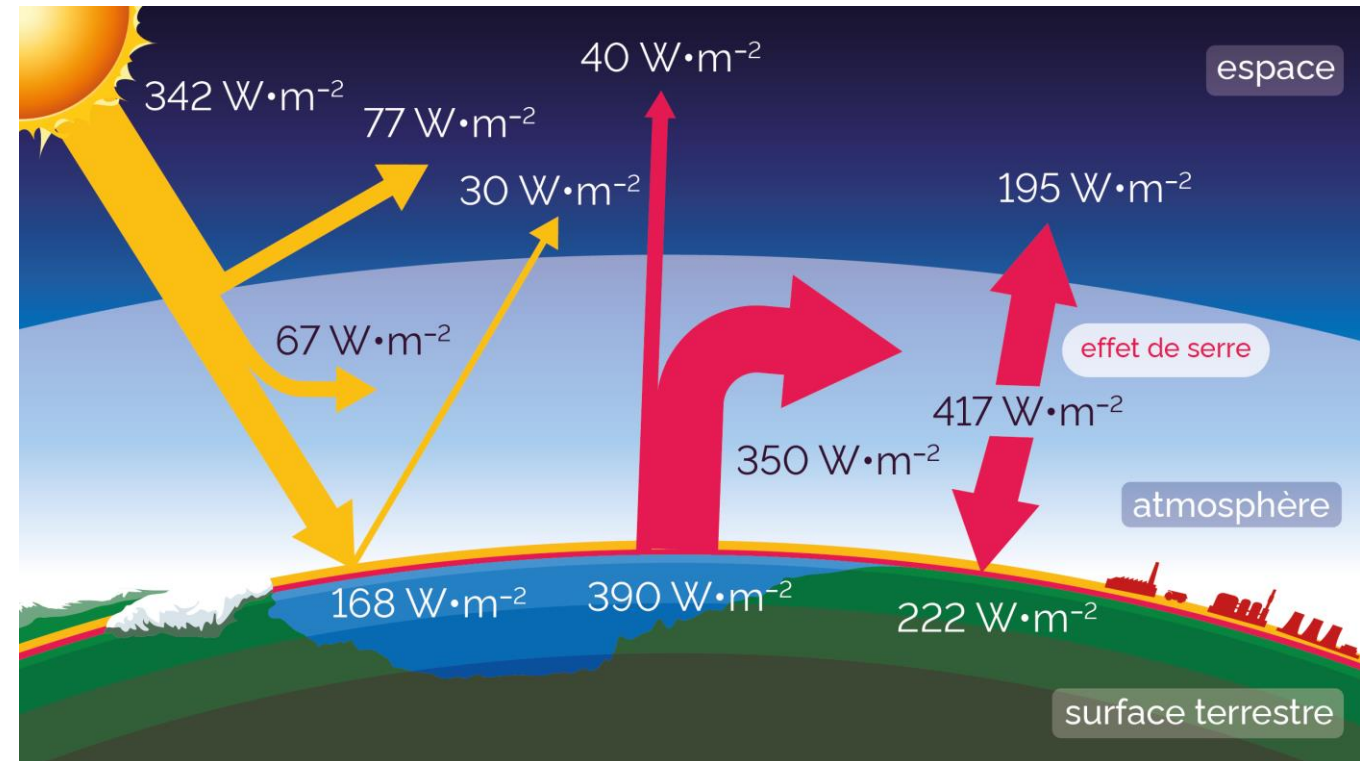
- La vapeur d'eau (H_2O)
- Le dioxyde de carbone (CO_2)
- Le méthane (CH_4)
- L'oxyde de diazote (N_2O).



- Une fois absorbé, ce rayonnement est émis par l'atmosphère sous forme de rayonnement infrarouge.
- L'atmosphère émet également sous cette forme le rayonnement solaire qu'elle a absorbé.
- Une partie est envoyée dans l'espace ($195 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$) et une autre vers la surface de la Terre qui l'absorbe ($222 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$) et la rechauffe

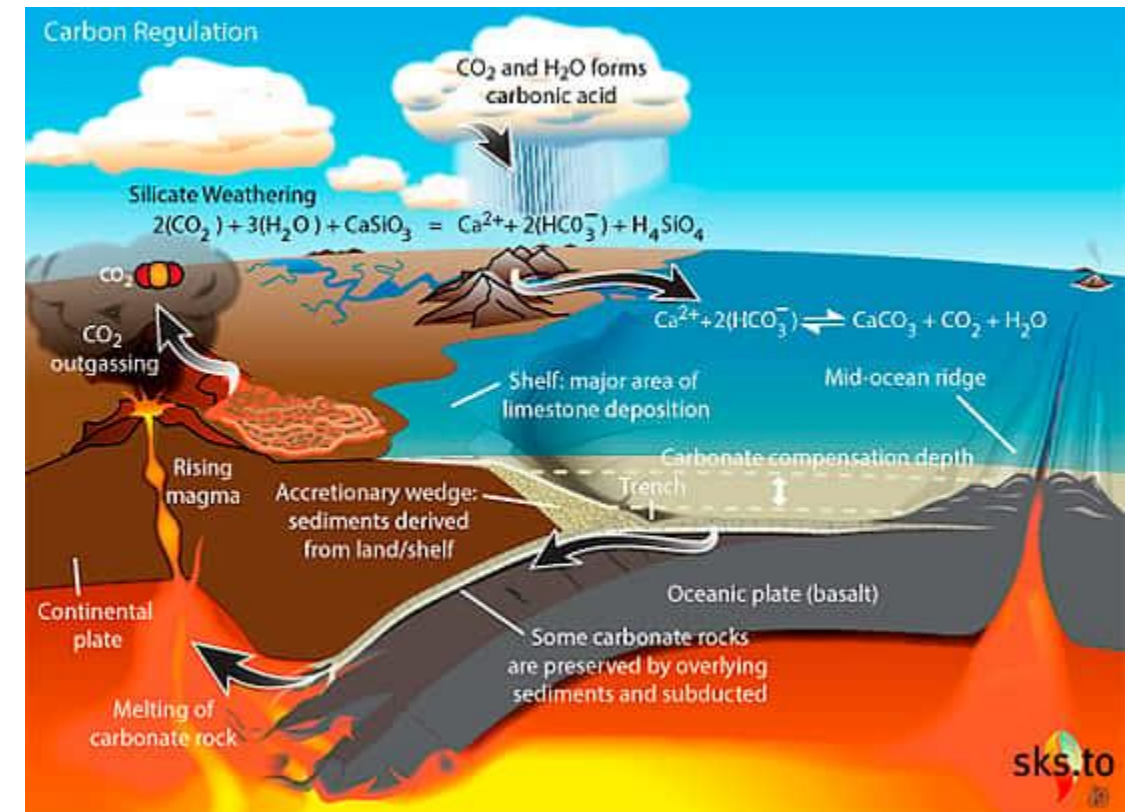


- On constate que la somme des puissances reçues ($168 + 222 = 390 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$) est égale à la puissance émise ($390 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$).
- La Terre est en **équilibre dynamique** car elle reçoit autant de puissance par unité de surface qu'elle en perd.
- La terre a gardé un **climat stable et habitable** grâce à un effet de serre qui empêche un **refroidissement excessif**.



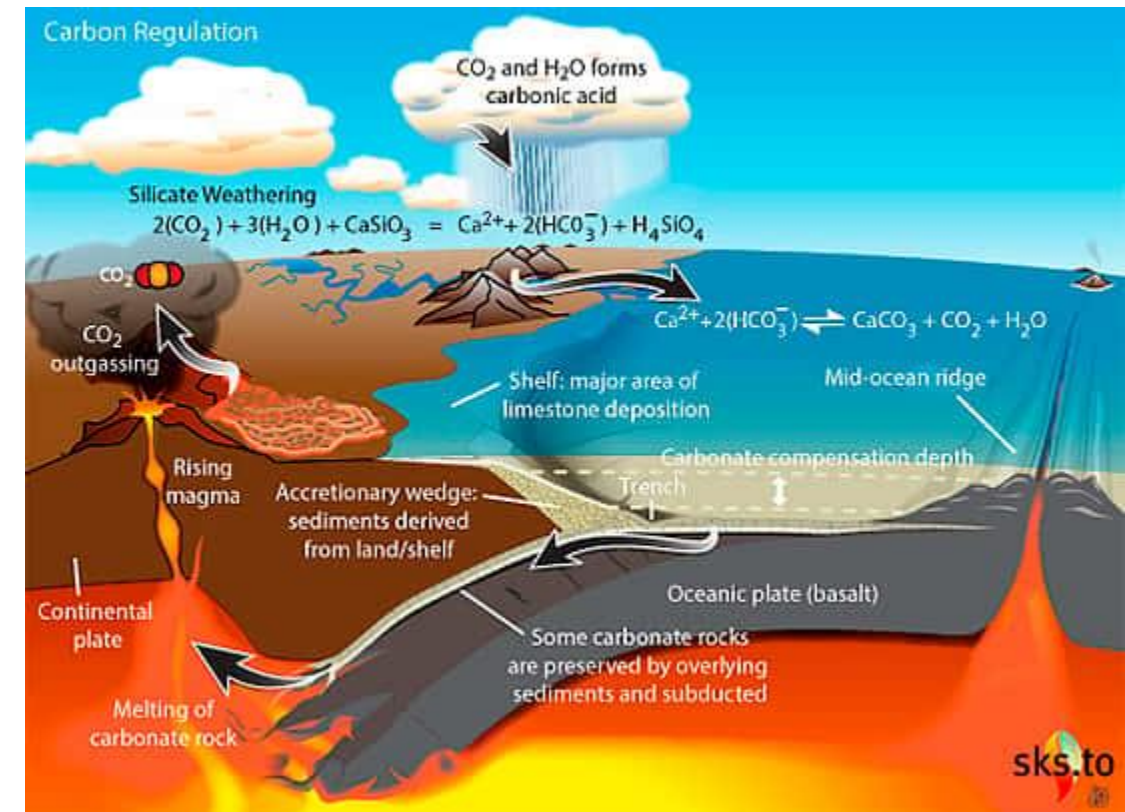
La terre a maintenu un climat stable et habitable en regulant l'effet de serre grace au **cycle du carbone**

- Initialement, le carbone dans l'atmosphère provenait des volcans et était majoritairement du CO₂, créant un effet de serre puissant et une temperature élevée sur la terre primitive.
- La tectonique des plaques favorise le dégazage de CO₂ par les volcans, qui est essentiel pour maintenir une atmosphère équilibrée.



La terre a maintenu un climat stable et habitable en regulant l'effet de serre grace au **cycle du carbone**

- L'apparition **de la boucle de rétroaction de l'altération des silicates** a définitivement stabilisé le climat terrestre:
 - Lorsqu'il fait chaud, l'altération chimique des roches s'accélère et envoie du calcium dans les océans
 - Ce calcium se combine avec le CO₂ pour former des roches, les carbonates piégeant ainsi le CO₂ dans les carbonates pour des millions d'années.
 - Lorsque les températures baissent trop, cette altération des roches ralentit car il pleut moins et il fait moins chaud, ce qui permet à davantage de CO₂ volcanique de s'accumuler dans l'atmosphère, augmentant l'effet de serre et réchauffant la planète.

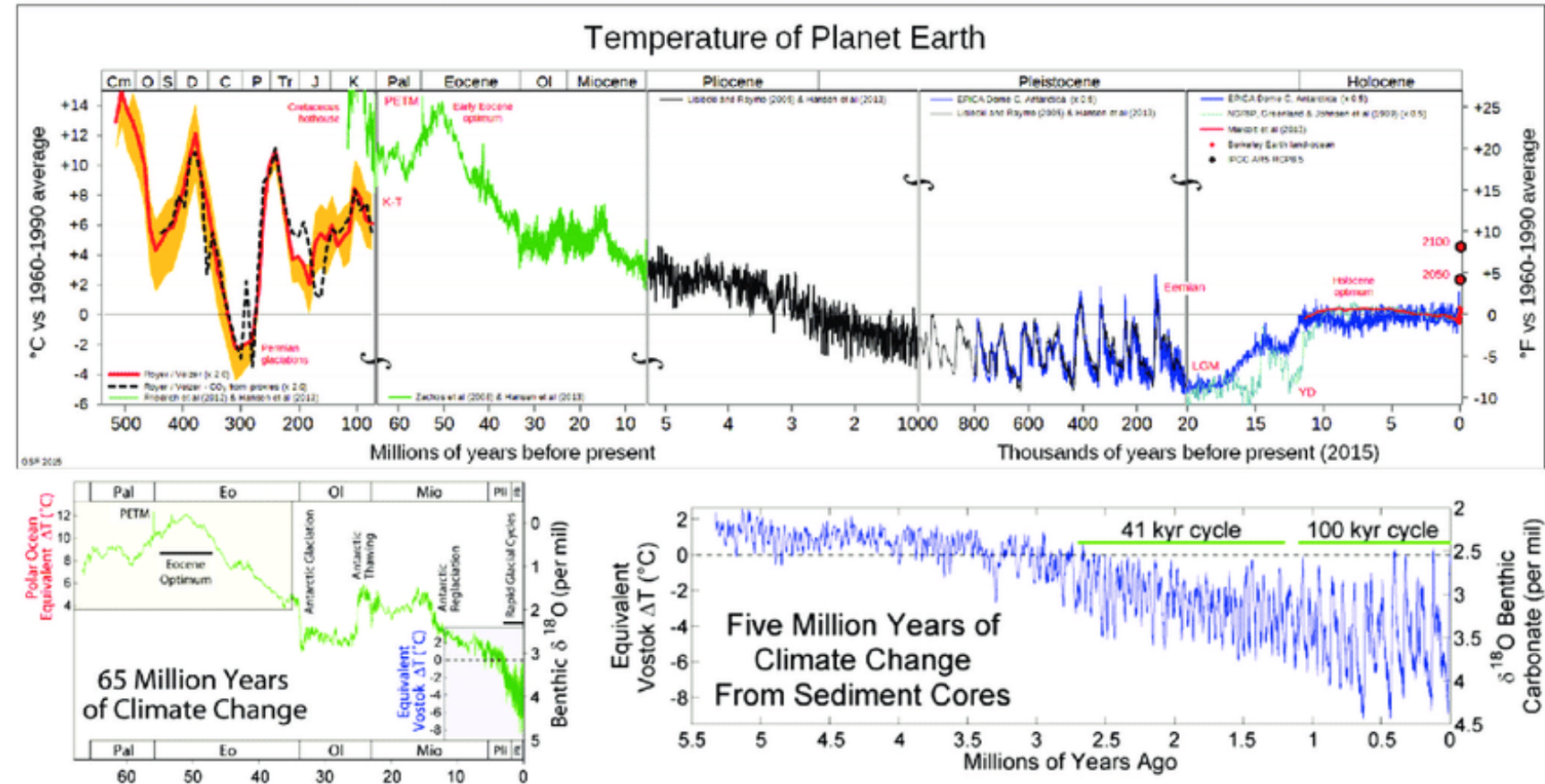


- Au fil du temps, le cycle du carbone s'est complexifié, intégrant des boucles de rétroaction supplémentaires qui stabilisent davantage l'effet de serre et permettent au climat terrestre de rester habitable sur des millions d'années.
- **Boucle de rétroaction de piégeage du carbone dans les plantes et la matière organique :**
 - Une augmentation de la végétation entraîne une captation accrue de CO_2 , qui est ensuite stocké sous forme de matière organique (charbon, biomasse). Cela contribue au refroidissement du climat.
 - Lorsque le climat devient plus froid, la croissance des plantes est limitée, ce qui réduit le piégeage du carbone dans la matière organique, favorisant un réchauffement.



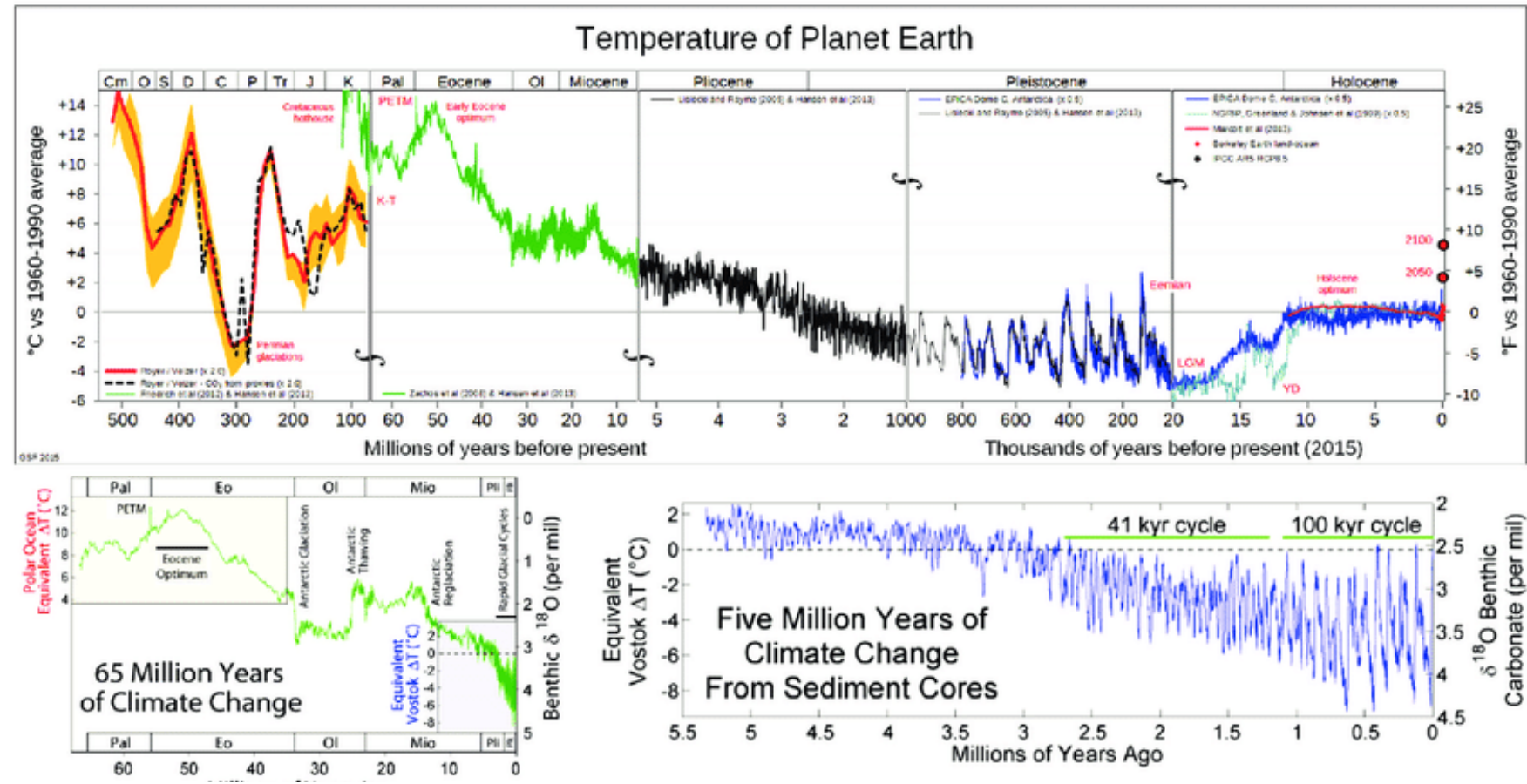
Ère Paléozoïque (541 – 252 Ma)

- Apparition et expansion des forêts terrestres (Silurien et Dévonien), réduisant le CO_2 atmosphérique et contribuant à un refroidissement global.
- Glaciation Karoo (fin du Carbonifère et Permien) : Formation de vastes dépôts de charbon, emprisonnant du CO_2 , et chute des températures.



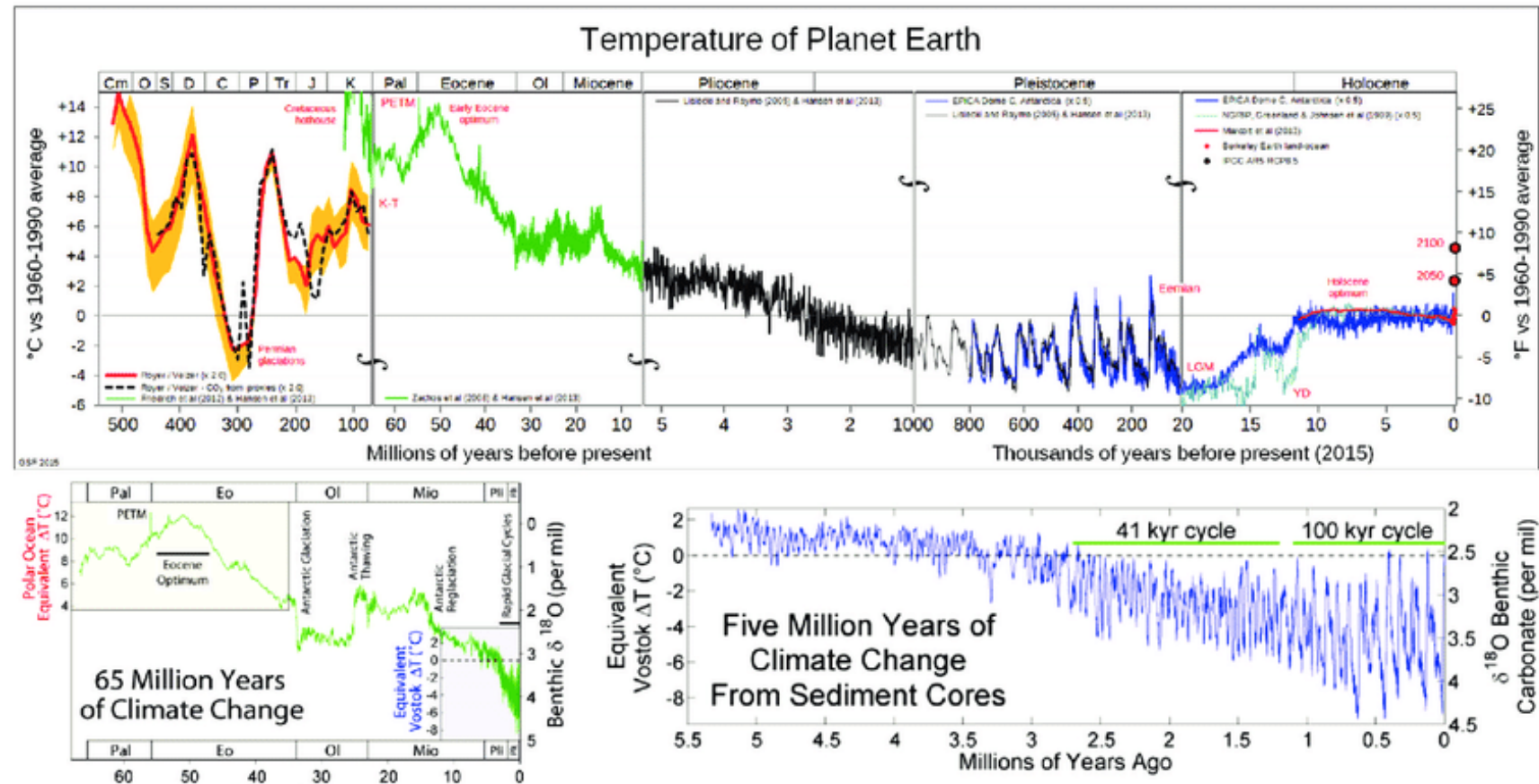
Ère Mésozoïque (252 – 66 Ma) :

- Augmentation des niveaux de CO_2 due à une forte activité volcanique (notamment durant le Crétacé), avec des climats chauds et humides.
- Absence de calottes glaciaires, permettant un environnement propice aux dinosaures et autres formes de vie.
- Climat globalement tropical et peu de glaciations.



Ère Cénozoïque (66 Ma – 0 Ma) :

- Diminution progressive du CO_2 réduisant l'effet de serre et initiant un refroidissement progressif.
- Formation des calottes glaciaires en Antarctique (~34 Ma) et dans l'Arctique (~2,6 Ma) : début de cycles glaciaires-interglaciaires.
- Variations climatiques au rythme des cycles de Milankovitch au cours du Pléistocène, avec alternance de périodes glaciaires et interglaciaires.



CCM
?

LES PARAMÈTRES DE

Milutin Milanković



Les cycles de Milankovitch sont des variations cycliques de l'orbite terrestre et de son orientation, qui influencent la quantité et la répartition de l'énergie solaire reçue par la Terre, jouant un rôle clé dans le climat.

1.Excentricité (cycle de 100 000 ans)

1. Variation de la forme de l'orbite terrestre (de plus elliptique à plus circulaire).
2. Affecte la distance entre la Terre et le Soleil, influençant l'intensité des saisons.
3. Lorsque l'orbite est plus elliptique, il y a une plus grande différence de rayonnement solaire entre les saisons.

2.Obliquité (cycle de 41 000 ans)

1. Variation de l'inclinaison de l'axe de la Terre (entre $22,1^\circ$ et $24,5^\circ$).
2. Plus l'inclinaison est forte, plus les contrastes saisonniers sont marqués.
3. Des variations d'inclinaison modifient l'intensité des saisons, influençant les calottes polaires.

3.Précession (cycle de 23 000 ans)

1. Changement dans l'orientation de l'axe de rotation terrestre, modifiant la direction du point de l'équinoxe.
2. Ce phénomène modifie la période à laquelle chaque hémisphère est plus incliné vers le Soleil.
3. Influence l'intensité des saisons et le moment des saisons par rapport à l'orbite elliptique.

Etude de cas: Pourquoi la Terre et Vénus ont des climats si différents?



